PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE FIXAÇÃO HIDRÁULICO E TÉRMICO DE BROCA DE METAL DURO EM FURAÇÃO DO CABEÇOTE DO MOTOR FIRE

Paulo Sérgio Martins

Belo Horizonte
2008

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

Paulo Sérgio Martins

AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE FIXAÇÃO HIDRÁULICO E TÉRMICO DE BROCA DE METAL DURO EM FURAÇÃO DO CABEÇOTE DO MOTOR FIRE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro

Belo Horizonte
2008

VERSO DA FOLHA DE ROSTO (FICHA CATALOGRÁFICA)

FICHA CATALOGRÁFICA
Elaborado pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Martins, Paulo Sérgio.
M386a Avaliação dos sistemas de fixação hidráulico e térmico de broca de metal duro em furação do cabeçote do motor fire / Paulo Sérgio Martins. - Belo Horizonte, 2008.
107 f.:il.

Orientador: José Rubens Gonçalves Carneiro
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Bibliografia.

1. Processos de fabricação. 2. Balanceamento de máquinas. 3. Desgaste mecânico. 4. Ligas de alumínio. 5. Usinagem. 6. Brocas. 7. Rugosidade. 8. Cabeçotes. I. Carneiro, José Rubens Gonçalves. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

DU:621.7

Paulo Sérgio Martins

AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE FIXAÇÃO HIDRÁULICO E TÉRMICO DE BROCA DE METAL DURO EM FURAÇÃO DO CABEÇOTE DO MOTOR FIRE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

_____

José Rubens Gonçalves Carneiro (Orientador) – PUC Minas

_____

Ernani Sales Palma – PUC Minas

_____

Sandro Cardoso Santos – CEFET/MG

_____

Alexandre Mendes Abrão – UFMG

Belo Horizonte, 17 de dezembro de 2008.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, José Luiz (in memoriam) e Amélia Teles pela minha formação como homem; e em especial à minha eterna companheira e amiga, Ana Cláudia, e às minhas filhas Mariana e Gabriela.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo ensinamento e paz espiritual para concluir essa tarefa.

Ao Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Wisley Falco Sales, pelo incentivo ao ingressar no mestrado e apoio durante o tempo que foi meu orientador.

Ao apoio oferecido pelo programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, em especial às secretárias Valéria e Letícia.

Aos companheiros de mestrado, Luiz, Alencar, Rômulo, Carlos e Vinícius.

Ao Gerente Willian Melo da FPT Powertrain, pelo apoio e incentivo na construção do conhecimento.

Aos companheiros do GIF da Powertrain dos setores de Engenharia de Aplicação, Programação de Materiais, Presetting e Afiação.

Aos companheiros dos setores da Engenharia de Processo, e da Sala tridimensional, Antonio Geraldo e José Micomedes.

Aos amigos da UTE 30-13 pelo apoio durante os pré-testes, ao CPAs Marcos Antônio e Ademir Claudio Murilo pela ajuda nos experimentos.

A FPT Powertrain pelo apoio nos experimentos e concessão da bolsa de estudos.

Aos colegas do laboratório químico e metalúrgico da FPT Powertrain na ajuda nas análises dos corpos de prova nas pessoas do Leonardo e Marcos.

Ao Professor de inglês Cristiano Santos, pela ajuda na correção da dissertação.

Ao colega Wander Miller pelo apoio nas traduções dos textos em inglês.

Aos alunos Larissa e Malange da iniciação cientifica do laboratório metalúrgico da Puc Minas.

A Fiat Automóveis pela concessão do laboratório metalúrgico para análise das ferramentas na pessoa do Sr.Leonardo.

Em especial aos meus irmãos, aos sogros - minha segunda família, e a todas as pessoas que contribuíram e apoiaram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

“Na verdade será verdade que cada ciência, no fim, se reduz a um certo tipo de mitologia”. “Émile Durkheim”

RESUMO

Empresas preocupadas em reduzir custos buscam alternativas que possam torná-las mais competitivas. Sistemas de fixação de ferramentas de corte, aliados à estabilidade dinâmica da máquina-ferramenta e à rigidez da ferramenta-suporte formam um conjunto de elevada importância, que afeta diretamente a qualidade da peça usinada, bem como nos custos associados. Atualmente, as empresas utilizam o sistema de fixação hidráulico por sua maior praticidade de manuseio no momento de preparação, troca da ferramenta e repetibilidade na montagem da ferramenta ao mandril hidráulico. Esse ajuste após pré-montagem permite tolerância de 0,003mm de batimento, porém apresenta custo elevado em processos de usinagem seriados ou não-seriados. Novas tecnologias tais como fixação térmica são usadas nos sistemas de fixação, proporcionado custos menores e tolerâncias mais próximas às obtidas no sistema de fixação hidráulica. Este trabalho comparou os sistemas de fixação hidráulico e térmico, utilizando-se broca de metal duro na furação do cabeçote de liga Al-Si fundida sobre pressão, avaliando-se tolerâncias do produto e desgaste da ferramenta. Neste estudo, utilizou-se microscopia ótica e eletrônica de varredura com analisador EDS para acompanhamento do processo de desgaste e medição de parâmetros geométricos e de textura superficial. Comprovou-se a alteração da evolução do processo de desgaste de flanco tanto no estágio I quanto no estágio II, e, também, o desempenho mais eficiente do sistema térmico em comparação ao sistema hidráulico.

Palavras-chave: Fixação hidráulica, Fixação térmica, Furação, Sistemas de fixação da broca.

ABSTRACT
(RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA)

Companies concerned with cost reduction seek alternatives to be more competitive. Cutting tool fixation systems, as well as machine-tool dynamic stability and tool-holder stiffness constitute a group of great importance, which directly influences the quality of the machined piece, and also the associated costs. Currently, companies use the hydraulic fixation system for its better handling during pre-mounting, tool change and tool assembly repeatability to the hydraulic. This adjustment after pre-mounting allows a 0.003mm run out tolerance, however with high cost, both in serial or non-serial machining processes. New technologies, such as thermal fixation, are used in order to obtain lower costs and achieve tolerances closer to those of the hydraulic fixation system. This work compares the hydraulic and thermal fixation systems, using hard metal drills in a motor head made of high pressure Al-Si alloy, evaluating product tolerances and tool wear. In this study, optic al and scanning electron microscopy and with EDS analyzer were usedto monitor tool wear, geometric deviantiou and surface texture parameters. Flank wear evolution was proven in stages I and II; additionally, more effective performance of the thermal system in comparison to the hydraulic system.

Keywords: Hydraulic fixation, thermal Fixation, Drilling, Drill Fixation systems

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de equilíbrio da liga Al-Si (SUAREZ, 2006). 22
Figura 2: Cinemática do processo de furação, mostrando a peça, a broca e os movimentos de corte e avanço (NOVASKI, 1996). 23
Figura 3: Aresta e superfícies de broca helicoidal (DINIZ, 2000). 30
Figura 4: Sistema de fixação HSK e fuso da máquina (GUHRING, 2005). 31
Figura 5: Sistema de fixação hidráulico, mostrando o parafuso acionador e o êmbolo de pressão do óleo (GUHRING, 2005).....32
Figura 6: Sistema de fixação térmico com o cilindro interno e a face HSK intercambiável (KELCH, 2004).....33
Figura 7: Variação dos ângulos de inclinação e saída em relação ao raio da broca (SHAW, 1984).....34
Figura 8: Representação esquemática das formas iniciais do cavaco formado em uma broca (KE et al, 2005). 35
Figura 9: Etapas descritivas de formação de cavaco (FACCIO, 2002). 35
Figura 10: Binário cisalhante que atua em uma aresta postiça (Venkatesh, V.C., 1996).....36
Figura 11: Principais fontes de geração de calor na formação do cavaco (FERRARESI, 1997). 37
Figura 12: Efeitos de diferentes profundidades e velocidade de corte nas temperaturas da broca HSS na furação de liga Al-Si 1040 (a, b e c). (OZCELIK.; B, 2006).....38
Figura 13: Distância da extremidade cortante em mm (Nouari., M, 2005). 39
Figura 14: Cinco tipos de desgaste de uma broca induzidos artificialmente dimensões em mm do desenho não estão na escala (APC-MAHFOUZ.; I, 2003). 42
Figura 15: Mapa de desgaste para ligas Al-Si em processo de furação a seco (ZHANG.; M.Z, 2001). 43
Figura 16: Diagrama esquemático da broca mostrando método medição do desgaste flanco. (A + B + C + D) / 4 (SUNDARARAJAN., G,.2008).....44
Figura 17: Desenho esquemático, método utilizado para medir o desgaste exterior na quina do flanco a partir de um ponto de referência fixo (A. Ber, S. Kaldor,1982).....44
Figura 18: Desenho esquemático do desgaste da broca helicoidal (ARENAS, 2003). 45
Figura 19: Diagrama esquemático de um modelo de uso de três fases de desgaste de uma broca HSS (Quick, D, 2003).....46
Figura 20: Criação de uma linha sobre a superfície média. 52
Figura 21: Os vales profundos são retirados e preenchidos. 53
Figura 22: Nova linha média sobre a superfície medida. 53
Figura 23: Nova linha média sobre a superfície do perfil primário.....53
Figura 24: Perfil de rugosidade filtrado em relação ao perfil primário. 53
Figura 25: Análise de um perfil com filtragem gaussiana e ISO 2CR de um perfil de rugosidade (OLIVEIRA, 2004).....55
Figura 26: Efeito da filtragem em função da quantidade de harmônicas (WHITEHOUSE, 1994).....56
Figura 27: Rugosidade média R_a (WHITEHOUSE, 1994).....56
Figura 28: Parâmetro R_z DIN (TAYLOR, 2000). 57

Figura 29: Parâmetro R_t (TAYLOR, 2000).....58
Figura 30: Representação da circularidade (TAYLOR, 2000). 59
Figura 31: Representação de cilindricidade (TAYLOR, 2000).....60
Figura 32: Centro de usinagem Huller utilizado na usinagem dos cabeçotes. 62
Figura 33: Sistemas hidráulico (a) e térmico (b) com broca de metal duro utilizados nos pré-testes. 63
Figura 34: Equipamento de medição Speroni, utilizado para preset de ferramentas. 63
Figura 35: Equipamento de medição do batimento posteriormente à montagem dos sistemas hidráulico e térmico. 64
Figura 36: Microscópio ótico OMIS MIMI de 20 à 125X de aumento. 66
Figura 37: Microestrutura da liga Al-Si, evidenciando a fase clara rica em alumínio e o eutético.....67
Figura 38: Cabeçote Fire com respectivos furos que foram analisados nos experimentos. Os furos de um cabeçote foram produzidos através de um mesmo sistema de fixação. 68
Figura 39: Batimento das ferramentas em relação ao número de peças usinadas...68
Figura 40: Diâmetro do furo de fixação da bucha de referência em função do número de peças.....69
Figura 41: Análise da cilindricidade dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico. 70
Figura 42: Análise da circularidade dos furos gerado pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico. 70
Figura 43: Análise da superfície R_a, R_t e R_z dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico. 71
Figura 44: Análise do desgaste VB_{max} das faces 1 e 2 da broca fixada nos mandris hidráulico (a) e (b) térmico. 72
Figura 46: Presença de material nas faces 1 e 2 da broca sistema hidráulico após furação da peça de número 500. 74
Figura 47: Análise química obtida por EDS em microscópio eletrônico de varredura do material aderido sobre a broca no mandril hidráulico.....75
Figura 48: Análise química da broca do sistema de fixação hidráulico. 75
Figura 49: Desgaste da aresta de corte da broca do sistema hidráulico após decapagem em solução de NaOH nas faces 1 e 2 na peça furada de número 500. 76
Figura 50: Análise química após decapagem em solução de NaOH nas faces 1 e 2 na peça usinada de número 500 com sistema de fixação hidráulico. 77
Figura 51: Presença de material da peça 500 nas faces 1 e 2 da broca do sistema térmico. 78
Figura 52: Análise química obtida por EDS em microscópio eletrônico de varredura do material aderido sobre a broca no mandril térmico (a, b e c). 79
Figura 53: Desgaste da aresta de corte da broca do sistema térmico após decapagem em solução de NaOH nas faces 1 e 2 na peça número usinada de número 500. 80
Figura 54: Análise química após decapagem em solução de NaOH nas faces 1 e 2 na peça usinada de número 500 em sistema térmico.....81
Figura 55: Batimento das ferramentas em relação ao número de peças usinadas...82
Figura 56: Análise da circularidade dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico. 82

Figura 57: Análise da circularidade dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico. 83
Figura 58: Análise da superfície R_a, R_t e R_z dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico. 84
Figura 59: Diâmetro do furo de fixação da bucha de referência em função do número de peças. 85
Figura 60: Análise do desgaste VB_{max} na aresta de corte da broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico. 85
Figura 61: Evolução do batimento das ferramentas em relação ao número de peças usinadas até 11.500. 86
Figura 62: Análise da cilindricidade dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico avaliados em dois filtros gaussianos de 1:15 e 1:50. 87
Figura 63: Análise da circularidade dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico avaliados em dois filtros gaussianos de 1:15 e 1:50. 87
Figura 64: Análise da superfície R_a, R_t e R_z dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico. 88
Figura 65: Presença de material da peça nas faces 1 e 2 da broca sistema hidráulico peça 11.500. 89
Figura 66: Análise química obtida por EDS em microscópio eletrônico de varredura do material aderido sobre a broca no mandril hidráulico. 90
Figura 67: Presença de material da peça nas faces 1 e 2 da broca sistema térmico peça 11.500. 91
Figura 68: Análise química obtida por EDS em microscópio eletrônico de varredura do material aderido sobre a broca no mandril térmico. 92
Figura 69: Análise do desgaste VB_{max} na aresta de corte da broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico. 92
Figura 70: Desgaste da aresta de corte da broca do sistema térmico e hidraulico após decapagem em solução de NaOH nas face 1 na peça número usinada de número 11.500. 93
Figura 71: Resíduo de alumínio fundido no WC-Co após 11.500 broca fixada no sistema térmico. 94
Figura 72: Desgaste de flanco maxímo da broca fixada nos sistemas térmicos hidráulico. 95
Figura 73: Diâmetro do furo de fixação da bucha de referência em função do número de peças. 96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química média aço AISI H13. 33
Tabela 2: Composição química média da liga Al-Si, em porcentagem em peso.....67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Tipos de acabamento (WHITEHOUSE 1994). 51
Quadro 2: Perfil primário decomposto. 52
Quadro 3: Efeitos dos filtros na análise do perfil de rugosidade.....54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2CR	Dois Capacitores e um Resistor
W	Tipos de hélices da broca
VB_Q	Desgaste da guia (mm)
VB_{max}	Desgaste de flanco máximo (mm)
VB	Largura média de desgaste de flanco (mm)
UPR	Ondulações Por Revolução
T	Classe de material
R_z	Média dos cinco maiores picos e maiores vales de um perfil
R_t	Altura máxima de rugosidade
Rpm	Rotações por minuto
RHSC	Contagem de pontos altos de rugosidade
R_a	Média aritmética dos desvios da superfície
Qd	Quadro
PCD	Diamante Policristalino Sintético
PCBN	Nitreto de Boro Cúbico Policristalino
NaOH	Hidróxido de Sódio
N	Rotações por minuto (rpm)
N	Tipo de hélice de broca
MD	Metal Duro
M	Classe de material
ISO	*"International Organization for Standardization"* *(O*rganização Internacional de Padronização*)*
In	Comprimento de avaliação
I	Comprimento de amostragem
HSK	*"Hohl Shaft Kegel" (Face de fixação)*
H7	Qualidade do furo gerado pela broca
H13	Aço Ferramenta
H	Tipos de hélices da broca
F_{CB}	Face de contato entre o cavaco e a aresta postiça
F_{BT}	Face de contato entre aresta postiça e a ferramenta

Eq	Equação
DIN	Deutsches Institut für Normung
DCL	Carbono com Diamante
Cut-off	Ponto de corte
CNC	Comando numérico computadorizado
BTA	Boring and Trepannating Association
APC	Aresta postiça
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a_p	Profundidade de corte (mm)
f	Avanço por rotação m/ver
v_c	Velocidade de corte (m/min)
ϕ	Diâmetro da peça (mm)
γ	Ângulo de inclinação do Cavaco
λ	Ângulo de saída do cavaco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17

1.1 Objetivos 19
1.1.1 Objetivos gerais 19
1.1.2 Objetivos específicos 19
1.2 Estado da arte 19
1.3 Organização do trabalho 20

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21
2.1 Fundição sob pressão de ligas Al-Si 21
2.3 Materiais de ferramenta 25
2.3.1 Aços carbono para ferramentas 25
2.3.2 Metal Duro 26
2.3.3 Cerâmicas 27
2.3.4 Cermets 28
2.3.5 PCBN e PCD – Diamante Policristalino Sitético 28
2.4 Classificação das brocas quanto à forma e aplicação 28
2.4.1 Geometria das brocas 29
2.5 Fixação de ferramentas 30
2.6 Formação de cavaco 34
2.7 Desgaste de ferramenta 40
2.8 Fluidos de corte 46
2.8.1 Classificação dos fluidos de corte 48
2.9 Parâmetros geométricos 50
2.9.1 Rugosidade 50
2.9.2 Processo de filtragem do perfil de rugosidade 51
2.9.3 Tipos de filtro 54
2.9.4 Análise de forma 55
2.9.5 Parâmetros de superfície geométrica 56
2.9.6 Tolerância geométrica 59

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS 61
3.1 Análise química e metalográfica do material 61
3.2 Usinagem do cabeçote máquina-ferramenta 61

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 67
4.1 Análise química e metalográfica do material 67
4.2 Parâmetros geométricos 68

CONCLUSÕES 97

TRABALHOS FUTUROS 99

1 INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio são utilizadas em uma série de indústrias em razão de sua resistência mecânica e baixa densidade, e a maior facilidade de usinagem entre os metais. A adição do silício ao alumínio decresce o seu ponto de fusão e melhora a resistência ao desgaste do componente. As ligas Al-Si são usadas na fabricação de componentes de motores de combustão que exigem fluidez e baixa tendência de contração em fundição sob pressão. Após fundição sob pressão de uma liga Al-Si, a produção do cabeçote do motor Fire se realiza em diversas operações de usinagem, tais como furação, alargamento, rosqueamento, mandrilamento, fresamento e operação de lavagem. Posteriormente a essas operações, o acabamento é fino sem necessidade de operações de retífica ou polimento As forças de corte e taxa de desgaste da ferramenta de corte são baixas devido à boa condução de calor da liga Al-Si (COTTERELL, M. G, 2002).

A usinagem é um processo utilizado na fabricação de componentes nos mais diversos setores industriais. A indústria automobilística é um setor de fabricação comercial de grande escala no qual a ênfase é reduzir impacto ambiental e custos de fabricação (HARRIS, 2000). Estima-se que em torno de 15 a 20% de todo o aço produzido no mundo seja transformado e removido por usinagem na forma de cavaco o que evidencia que este processo apresenta perspectivas reais de aprimoramento tanto no que tange aos equipamentos quanto em operação. (DINIZ, 2001) definem a usinabilidade como uma grandeza tecnológica comparativa, ou seja, que expressa por meio de um valor numérico o confrontamento de um conjunto de propriedades de usinagem. A usinabilidade de um material pode ser obtida levando-se em consideração o número de componentes produzidos por hora, o custo de usinagem do componente ou a qualidade final da superfície trabalhada (TRENT; WRIGHT, 2000). O processo de usinagem é não-linear envolvendo fenômenos como deformação plástica, fratura, impacto, pontos de contato intermitentes, contínuos e desgaste, e se caracteriza pela geração de calor e elevada temperatura de corte. Em razão da complexidade do processo de corte, muitas vezes não é, possível obter uma descrição matemática da dinâmica do processo o que pode ser superado, às vezes, através da utilização de medição indireta através de sensores. Em temperatura elevada, a ferramenta de corte pode

perder sua forma rapidamente ou desgastar resultando em acréscimo na força de corte, inexatidão dimensional do produto, redução de vida, dano mecânico e químico da superfície acabada. Elevada temperatura pode ser controlada por injeção de óleo corte na interface cavaco-ferramenta. Dentre os processos de usinagem tradicionais, a furação é uma das operações de corte de metal mais importantes, consistindo de 33% de todas as operações de usinagem, e responsável por aproximadamente 40% de toda operação de remoção de metal na indústria aeroespacial (ERTUNC; OYSU, 2004).

Furação é um processo de usinagem utilizado para obtenção de superfície cilíndrica interna, sendo esta coaxial ao eixo de rotação do movimento de corte, considerado como de desbaste, semi-acabamento ou acabamento. A furação de ligas Al-Si apresenta dificuldade devido adesão do alumínio à broca. A qualidade de um furo do processo é determinada por uma síntese dos erros devido à dinâmica do processo e, também, ao regime térmico na interface peça/broca. Os mecanismos que induzem estes erros incluem: desvios ou rotação anormal da broca na entrada; deflexões da broca devido às forças desbalanceadas; erros devido à falha de processo; erros devido ao corte nas bordas da broca; erros devido à expansão térmica da broca e da peça. A rigidez da broca determina, em grande parte, os erros induzidos devido aos mecanismos dinâmicos, mas não é afetada pela presença/ausência do revestimento da broca (KALLIDAS, 2001).

Diversos sistemas de fixação estão em desenvolvimento atualmente para garantir maior rigidez ao sistema de furação entre os quais a fixação térmico em substituição ao hidráulico. A implantação do sistema de fixação térmico exige investimento, e suas vantagens ainda não estão evidenciadas. O sistema de fixação define tolerâncias dimensionais e de superfície e erros de forma dos furos usinados. O desenvolvimento deste processo se torna inviável em laboratório devido ao alto custo de obtenção de matéria-prima e tempo de desgaste dos mandris hidráulico e térmico. A utilização de sistemas de fixação (porta-ferrramentas) no processo de furação, devido à quantidade de ferramentas utilizadas para confecção dos furos, torna o custo do processo elevado para as indústrias automobilísticas.

Essa dissertação se propõe a verificar os sistemas de fixação hidráulico e térmico no processo de usinagem de dois furos acabados do cabeçote de liga Al-Si, executada por brocas de metal duro de dois diâmetros, utilizando-se mandril HSK63 hidráulico e mandril HSK63 térmico em centro de usinagem Huller.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Analisar o desempenho dos diferentes sistemas de fixação de brocas (hidráulico e térmico) de metal duro, utilizados no processo de furação de cabeçote de liga Al-Si.

1.1.2 Objetivos específicos

Para os sistemas de fixação avaliados, hidráulico e térmico, têm-se como objetivos específicos:

1. Avaliar erros de forma dos furos usinados quanto à cilindricidade, circularidade dimensional dos furos e topografia da parede do furo usinado e erro de batimento das brocas montada nos sistemas de fixação;
2. Avaliar desgaste de ferramenta ao longo do processo de furação;
3. Análise pontual na região de desgaste por processo de decapagem.
4. Comparar vida da broca de metal duro montada nos sistemas de fixação térmico e hidráulico.

1.2 Estado da arte

A usinagem é constituída por todos os processos de fabricação onde uma porção de material é removida da peça, por cisalhamento, na forma de cavaco. A furação é um dos mais importantes métodos de usinagem para ligas de alumínio fundidas sob pressão. Atualmente, constroem-se os mapas de mecanismos de desgaste sobre condições fixas de material da ferramenta, material usinado e parâmetros de usinagem. Com o intuito de proteger o meio ambiente, conduz-se a

usinagem sem lubrificante. A furação a seco das ligas de alumínio não foi ainda bem estabelecida em razão da adesão do alumínio à broca. Alguns revestimentos tradicionais tais como TiN, TiCN e AlN estão entre estes revestimentos que têm demonstrado desempenho tribológico inaceitável para as ligas de alumínio. Alguns estudos demonstraram, por sua vez, que ferramentas revestidas à base carbono, tais como diamante ou carbono como diamante (DLC) apresentaram desempenho satisfatório na furação a seco das ligas de alumínio.

Este trabalho estuda a furação de ligas de alumínio, mas compara dois sistemas de fixação da broca de metal duro utilizada nesta operação.

1.3 Organização do trabalho

No presente capítulo são apresentadas as justificativas, os objetivos e o estado da arte do tema tratado neste trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre os tópicos principais e relevantes deste projeto. São abordados temas como processos de furação, sistemas de fixação, tipos de brocas, tipos de afiações, e materiais para peças e ferramentas de corte.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada para realização do trabalho experimental.

No Capítulo 4 é apresentada a Discussão e Análise de Resultados dos experimentos, comparando-os com os outros encontrados por outros pesquisadores.

No Capítulo 5 apresenta-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundição sob pressão de ligas Al-Si

A fundição sob pressão é um processo capaz de produzir peças relativamente complexas e com excelente acabamento superficial em elevado volume de produção. Dentre os processos industriais de transformação de metais é um dos mais severos quanto à solicitação sobre o ferramental, onde se podem verificar velocidades de fluxo de 40 m/s e gradientes de temperatura de até 1000ºC/cm como estas solicitações são necessárias para se obter altas taxas de produção, elas, também, acabam limitando a vida das ferramentas. Dentre os principais mecanismos que levam ao desgaste e perda do ferramental pode-se destacar erosão causada pelas altas velocidades com que o metal fundido colide com as cavidades da ferramenta, trincas térmicas causada pela fadiga térmica devido ao aquecimento e resfriamento alternado da superfície da ferramenta durante a fundição e adesão/ corrosão causada pela interação química entre a liga fundida e a ferramenta durante o preenchimento e solidificação (SATURNINO, 2004).

As ligas Al-Si são utilizadas em componentes de motor de combustão interna em razão de sua média a alta resistência mecânica que facilita seu processamento por técnicas de fundição sob pressão. A fluidez e baixa contração da liga Al-Si eutética constituem em vantagem sobre as ligas hipoeutéticas, porém menor resistência e ductilidade inibem a sua maior utilização. (SUAREZ et at, 2006) estudam a alteração da estrutura das ligas eutéticas com a introdução dos agentes modificadores tais como Sr e Ti o que mostrou contornar os problemas de baixa ductilidade da liga. As ligas Al-Si mais usadas compreendem as hipo, hiper ou eutéticas com a faixa de silício entre 10 e 18% em peso (Figura 1).

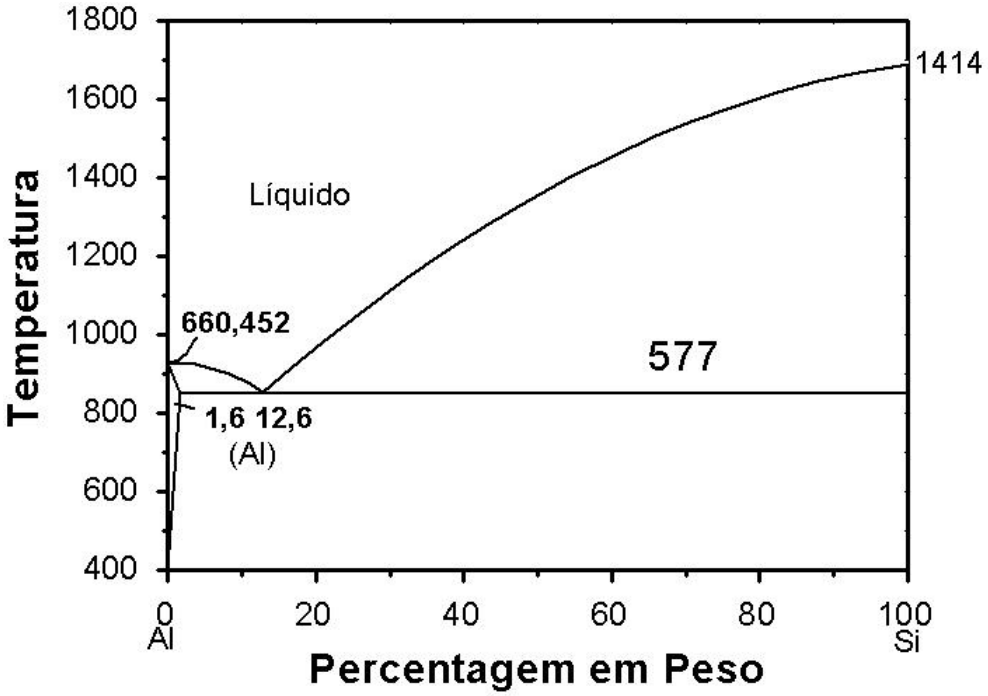


Figura 1: Diagrama de equilíbrio da liga Al-Si (SUAREZ, 2006).

Em geral, as ligas de alumínio apresentam boa usinabilidade para vários critérios de avaliação. A força exigida na ferramenta, quando se usina as ligas de alumínio, é baixa, e tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte (TRENT; WRIGHT, 2000). O silício endurece por solução sólida o alumínio e acelera o desgaste da ferramenta por abrasão. O silício possui maior ponto de fusão e, assim, o efeito do aumento da fase rica em silício se traduz em usinagem com maiores tensões e temperatura presente na interface entre ferramenta-peça (REIS; ABRÃO, 2005; TRENT; WRIGHT, 2000). O teor de silício da liga pode proporcionar partículas primárias mais duras que ocasionam desgaste por abrasão da ferramenta (TEER, D.G, 2005).

Verifica-se, também, elevação na taxa de desgaste da ferramenta, quando se usina a liga Al-Si com ferramenta composta de carbonetos, limitando-se a velocidade de corte pelo desgaste do tipo “attrition”. Este tipo de desgaste na peça usinada não depende apenas das fases presentes na peça, mas, também, da sua quantidade e distribuição (TRENT; WRIGHT, 2000).

2.2 Processo de furação

Usinagem dos materiais é um processo de transformação onde uma porção de material de forma irregular (cavaco) é retirada da peça pela ferramenta. Dentre os processos de usinagem, tem-se a furação como operação de desbaste e acabamento para dar ao furo as características operacionais, tais como melhor precisão dimensional, maior precisão de forma e de alinhamento superficial, etc.

Furação é um processo de usinagem utilizado para obtenção de superfície cilíndrica interna, sendo esta coaxial ao eixo de rotação do movimento de corte. A rotação pode ser tanto da peça quanto da ferramenta, simultaneamente ao deslocamento de uma delas segundo trajetória retilínea ou paralela ao eixo de rotação da máquina (Figura 2).

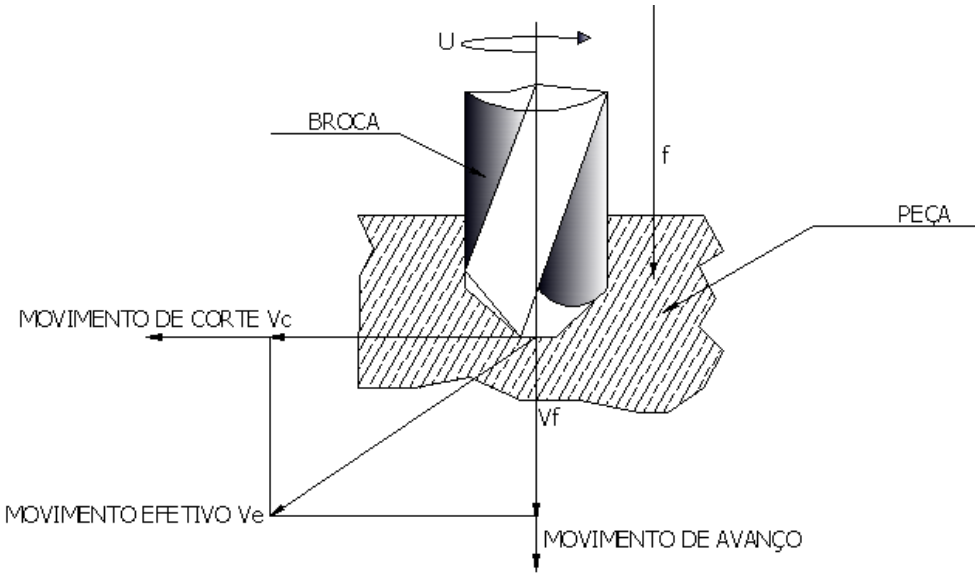


Figura 2: Cinemática do processo de furação, mostrando a peça, a broca e os movimentos de corte e avanço (NOVASKI, 1996).

O processo de furação é um dos processos mais utilizados na indústria manufatureira. Pode ser classificado como cheio, escareamento, escalonado, de centro e trepanação. O processo de furação considera a relação entre o diâmetro e o comprimento do furo, a qual depende da técnica utilizada e do desvio de linearidade requerido. Métodos mais simplificados permitem que o comprimento do furo seja até 3 vezes maior que seu diâmetro, para que ainda se consiga boa

qualidade do furo. A utilização de ferramentas, técnicas e equipamentos especiais permitem a elevação desta relação para 8.

Dentro dos processos de usinagem para abertura de furos, a furação é a mais empregada, porém há restrições de brocas na realização de furos de grandes diâmetros e/ou furações profundas. Sistemas especiais de furação tais como brocas canhão e o sistema BTA permitem a execução de furos com relação entre comprimento e diâmetro superior a 100 na faixa de diâmetro de 6 a 750 mm

Quando se considera a repetição, a furação é uma das operações mais comuns dentre os procedimentos de corte tais como torneamento, fresamento e retífição. A falha na furação deve receber atenção especial no processo, uma vez que o acesso difícil ao local de remoção de cavaco compromete a saída dos mesmos e a segurança do processo (WEINERT; 2002 ERTUNC; OYSU, 2004; FURNESS, 1999).

A velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, respectivamente, indexadas por, v_c, f e a_p são as variáveis mais importantes neste processo.

A velocidade de corte v_c é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte. Para processos com movimento de rotação, a velocidade de corte é calculada pela Eq. 2.1.

$$v_c = 0{,}001 \times \phi \times f \times n \qquad (2.1)$$

onde ϕ é o diâmetro da peça (mm) ou da ferramenta, no caso de ferramentas rotativas, e n corresponde ao número de rotações por minuto. O avanço f é o percurso de avanço em cada volta (mm/volta) ou em cada curso da ferramenta. A profundidade de corte a_p é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta na peça, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho (NBR6162/1989). Na furação com brocas helicoidais, os esforços atuantes estão ligados à geometria da broca e às condições de corte do processo tais como, avanço, velocidade de corte e rigidez do conjunto peça / máquina-ferramenta (ARENAS, 2003).

Na faixa de valores empregados na indústria, a velocidade de corte apresenta influência discreta na força de usinagem. De acordo com (FERRARESI, 1977), em baixas velocidades de corte e na ausência de aresta postiça de corte, ocorre queda

nos valores da força de corte. A velocidade de corte afeta a estabilidade pelo processo de amortecimento que ocorre em velocidades abaixo de 25m/min, e, também, em velocidade de corte elevada tem-se aumento da força de corte, desgaste de ferramenta e geração de calor com elevação de temperatura na interface cavaco-ferramenta.

O aumento do avanço tende a aumentar a força de usinagem devido ao fato de se ter o aumento das áreas referentes aos planos de cisalhamento (MACHADO; SILVA, 1999).

O avanço afeta as condições de integridade da ferramenta, as condições dimensionais do furo e o tempo de usinagem. Usualmente, valores maiores de avanço propiciam elevação nos valores de rugosidade, do diâmetro usinado e forças de corte (BEZERRA, 2001). Alterações no avanço refletem mais significativamente no tempo de usinagem que as alterações de rotação.

2.3 Materiais de ferramenta

2.3.1 Aços carbono para ferramentas

Os materiais utilizados na fabricação das ferramentas são os aços carbono, aços rápidos divididos nas classes M e T para brocas, alargadores, machos, cossinete, bits, facas rebarbadoras, criadores de engrenagem, entre outros. O aço-rápido utilizado como ferramenta apresenta, usualmente, faixa de carbono entre 0,7 a 1,2 %C e elementos de liga. Os principais elementos de liga são W, Mo, V e Cr que têm tendência à formação de carbonetos. Os carbonetos formados são duros o que confere ao aço elevada resistência ao desgaste e dureza a quente.

A utilização de ferramenta de aço-rápido está limitada a baixa velocidade de corte relativa, onde este parâmetro é inferior à velocidade econômica de corte dos materiais de ferramentas mais resistentes (SALES; SANTOS, 2003). Em adição ao desenvolvimento do próprio aço rápido, é largamente reconhecido que somente a adoção de um método de modificação da superfície e revestimento da ferramenta pode alcançar qualquer melhoria significativa no desempenho da ferramenta.

Conseqüentemente, vários métodos de deposição e tipos de revestimentos tais como TiN, AlN, TiCN, CrN, TiAlN e diamante como carbono têm sido introduzidos para aplicações industriais na condição de monocamadas e multicamadas. (TSAO, C.C, 1999) mostraram que a broca revestida com multicamadas de TiCN apresentou a menor taxa de desgaste entre os revestimentos de monocamada de TiN e multicamadas de TiN/TiCN/TiN, e, também, esta broca pôde ser usada com velocidades de eixo até 1030rpm na furação de aço carbono.As vantagens potenciais de uma ferramenta revestida são elevação de vida, melhoria da qualidade superficial do produto e aumento da taxa de produção (SUNDARARAJAN, G, 2008).

2.3.2 Metal Duro

A mistura do pó de WC com o cobalto trouxe ao mercado os metais duros para ferramentas de corte (DINIZ; COPPINI, 1999). O pó de tungstênio e cobalto são misturados e comprimidos a pressões de 0,5 g/cm^2 em temperaturas de 700 ~ 800ºC. Após esta compressão, segue a sinterização onde a “pastilha” é elevada a uma temperatura de 1400 a 1600ºC (MARCONDES, 1990). Com a utilização de centros de usinagem CNC é possível trabalhar com rotações consideradas altas para furação o que requer desenvolvimento de broca revestida (DINIZ, 2000).

Os metais duros podem, também, ser revestidos com camadas de TiC, TiN, Al_2O_3, HfN, HfC, TiB_2 entre outros, variando o revestimento e o número de camadas de acordo com sua aplicação (MACHADO; SILVA, 1999). (LAHRES, 1997) fresaram ligas de alumínio para indústria aeronáutica (AlZnMgCu1,5) e automotiva (Al-Si10Mg) com substrato de carbeto de tungstênio e vários recobrimentos. Os autores mostraram que o CrN, MoS_2 , TiN, e TiNAl formavam aresta postiça excessiva devido à ação química e reações de difusão entre os elementos de transição no revestimento (Cr,Mo, Ti) e o material da peça (Al,Zn, Mg, Cu).

Ao contrário, revestimento DLC exibiam menor tendência à formação de aresta postiça. O termo DLC descreve um grupo de revestimento de carbono, consistindo diamante sp^3 e grafita com átomos de carbono sp^2. Eles têm propriedades mecânicas e tribológicas combinando atrito baixo (0,01 - 0,15) com alta dureza, este último aspecto sendo principalmente dependente da concentração sp^3

no filme. Revestimento tendo até 10% de carbono sp^3 têm uma dureza de 1500-3000HV, enquanto a 15-20% sp^3 a dureza é de 3000-5000HV. Não surpreendente, em níveis aproximados de 100% $sp^{3,}$ a dureza se aproxima do diamante natural entre 8000-9000HV. Problemas de adesão e fragilidade têm, de algum modo, limitado seu uso, contudo, adições com metais, nitretos e carbetos ajudam a superar este problema (RENEVIER, N.M, 2004).

Com o aumento da velocidade de corte a ferramenta de metal duro está tomando cada vez mais espaço nas operações de usinagem, inclusive na furação, este tipo de ferramenta é composto de um carboneto de tungstênio (WC) em pó disposto em uma base aglomerante também em pó de cobalto (Co).

SALES; SANTOS, (2003) afirmam que o sucesso do metal duro é o fato deste possuir a combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade em níveis elevados.

Para melhorar outras características, também, adiciona-se elementos de liga como Ti, Ta e/ou Nb; que principalmente reduzem os problemas de caracterização na usinagem de aços.

2.3.3 Cerâmicas

As ferramentas cerâmicas são à base de Al_2O_3 e de Si_3N_4. A cerâmica de Al_2O_3 pura é constituída de finos grãos de Al_2O_3 sinterizados. Estas ferramentas possuem alta dureza e resistência ao desgaste, mas baixa tenacidade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000). As cerâmicas à base de Al_2O_3 com adição de ZrO_2 / TiC, conferem maior tenacidade às ferramentas em comparação às cerâmicas puras. As cerâmicas à base de Si_3N_4 têm sua principal aplicação no fresamento do ferro fundido. Alumínio é comumente usinado com aço rápido ou ferramenta de carbeto de diamante, enquanto que cerâmicas de Si_3N_4 não são usadas devido a alta solubilidade do silício no alumínio (COTTERELL, M.G, 2002).

2.3.4 Cermets

O cermet é um produto com duas fases (metálica e cerâmica) e por esta razão situa-se na classificação entre o metal duro e as cerâmicas. A sua formulação básica é constituída por TiC, TiN e Ni como aglomerante. A elevada quantidade de TiC na composição e afinidade química com a maioria dos metais não ferrosos, torna o seu campo de aplicação limitado à usinagem dos ferrosos. Segundo (BECK,1996) os cermets podem trabalhar em velocidades de corte 50% superiores as utilizadas com o metal duro.

2.3.5 PCBN e PCD – Diamante Policristalino Sitético

O nitreto cúbico de boro tem como principal aplicação a usinagem de precisão com baixas profundidades de corte e avanços, pois este material apresenta baixa resistência à flexão e grande fragilidade Estas ferramentas tem elevada dureza, resistência ao desgaste e capacidade refratária, além de permitir arestas de corte muito afiadas e com pequena tendência a aderência de material. Entretanto o PCD deve ser utilizado em máquinas-ferrametas rígidas, pois devido a vibração, pode ocorrer impactos na ferramenta que levaria ao lascamento, (PCBN) e o PCD (Diamante Policristalino) se enquadram na classe dos materiais ultraduros (WEINGAERTNER; SCHROETER; TRENT, 2000; BEZERRA, 1998).

2.4 Classificação das brocas quanto à forma e aplicação

Os tipos de broca podem ser divididos em grupos de uso geral e de condições severas de acordo com a dificuldade de execução do furo (ASM Metals Handbook, 1989). As brocas de uso geral podem sofrer alterações na geometria de corte e as brocas de condições severas suportam elevadas tensões de torção e apresentam maior rigidez que as primeiras. Dentro destas classes, encontram-se as helicoidais,

com ângulo de hélice reduzido, com ângulo de hélice elevado, com comprimento de hélice reduzido, com canais para injeção de fluido de corte, com mais de dois canais, com hélice à esquerda e espanada.

2.4.1 Geometria das brocas

A broca helicoidal é normalizada de acordo com suas características construtivas e geométricas (DIN 1836, DIN 1962, ABNT PB-286, 1977). Em função das suas características construtivas e aplicação na usinagem dos materiais, as brocas helicoidais possuem três tipos de hélices normalizadas:

- Tipo W: possui passo curto e é recomendada para materiais que formam cavacos longos, tais como ligas de alumínio, magnésio, etc;
- Tipo N: possui passo normal e é recomendada para materiais mais comuns, como aços, ferros fundidos e materiais similares;
- Tipo H: possui passo longo, recomendado para materiais que formam cavacos curtos, tais como ligas de cobre, liga de zinco, borracha dura, baquelite e certos materiais plásticos.

As arestas transversais e principais constituem as principais faces de corte da broca, sendo que a aresta transversal progride no interior da peça, enquanto que a outra face expulsa o material e produz a maioria do torque de furação e da força de avanço. A contribuição da aresta de corte principal para força e torque experimentada pela broca é de, respectivamente, 40 a 80%, enquanto que a contribuição da aresta transversal é de 57 e 8%, respectivamente, para a força e torque. Brocas helicoidais são geralmente satisfatórias para a furação de ligas de alumínio para furos profundos, elevadas espirais com ângulo de hélice de 40-48°, ângulo da ponta na faixa de 130-140º que produz cavaco mais estreito que é mais facilmente expelido através dos canais da broca. Saída dos cavacos e adesão dos mesmos nos canais são dois dos principais problemas o que torna a lubrificação necessária e importante na furação. (COTTERELL, M.G, 2002, DINIZ, 2000) definem as partes de uma broca helicoidal (Figura 3).

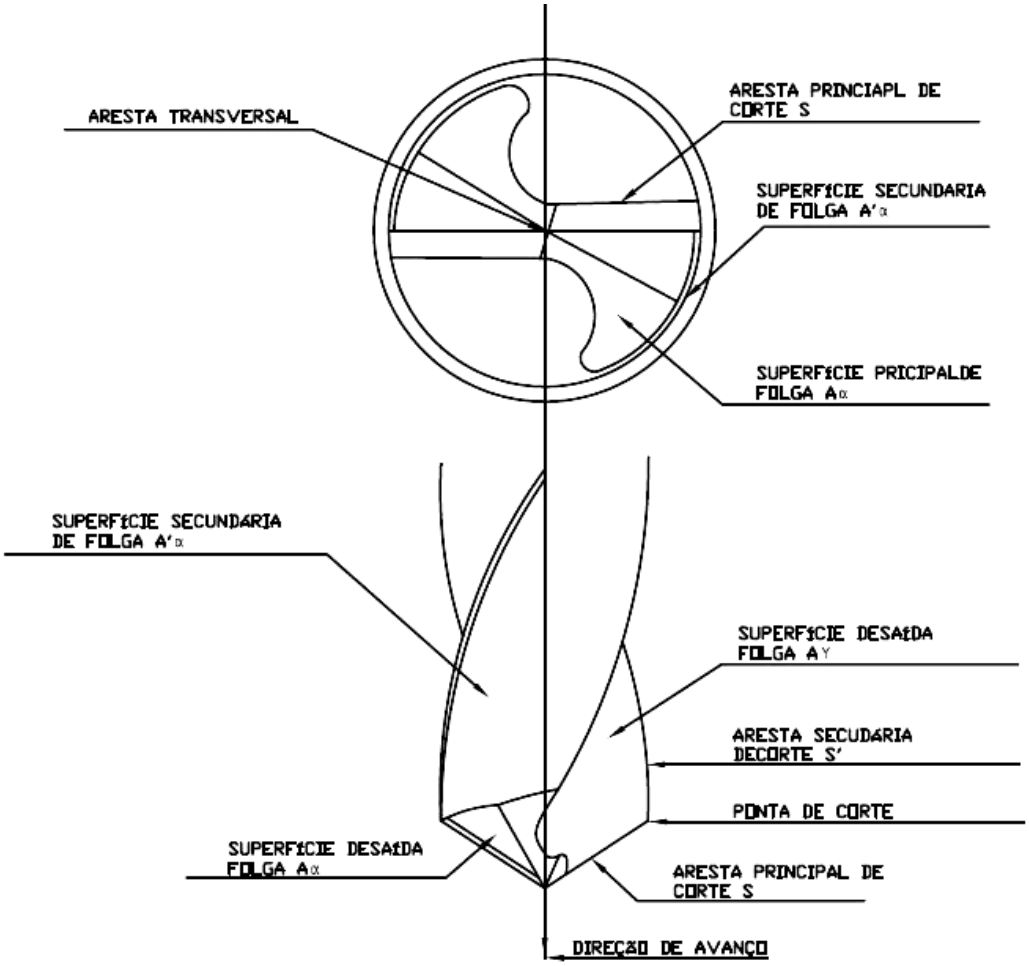


Figura 3: Aresta e superfícies de broca helicoidal (DINIZ, 2000).

2.5 Fixação de ferramentas

A fixação, troca, armazenamento, manuseio e administração de ferramentas é um elo crítico na cadeia que suporta a usinagem bem sucedida. A troca de ferramentas pode ser manual ou mecânica, e a sua eficiência é governada pelo sistema de fixação da ferramenta com o fuso da máquina (SANDVIK, 2003). O sistema de fixação de ferramenta opera em condições especialmente difíceis, uma vez que está localizado diretamente na ação da força entre a peça e a máquina.

Além das condições usuais de rigidez e requisitos gerais de corte (transmissão de torque e de forças de usinagem), o sistema deve garantir ótimas condições geométricas (batimento, concentricidade) e possibilitar a troca rápida de ferramentas (SCHULTZ; MORIWAKI, 1993). Nos sistemas de fixação térmico e

hidráulico, tem-se um dispositivo que age como uma interface intercambiável entre o fuso da máquina-ferramenta e a ferramenta de corte chamado porta-ferramentas.

Uma das interfaces intercambiáveis recentemente desenvolvida é o cone vazado HSK que possui maior rigidez e melhor repetibilidade de posicionamento da ferramenta (WECK; SCHBERT, 1996). Este sistema ajusta, além da superfície do cone, a face ao eixo-árvore através de garras localizadas no seu interior (Figura 4).

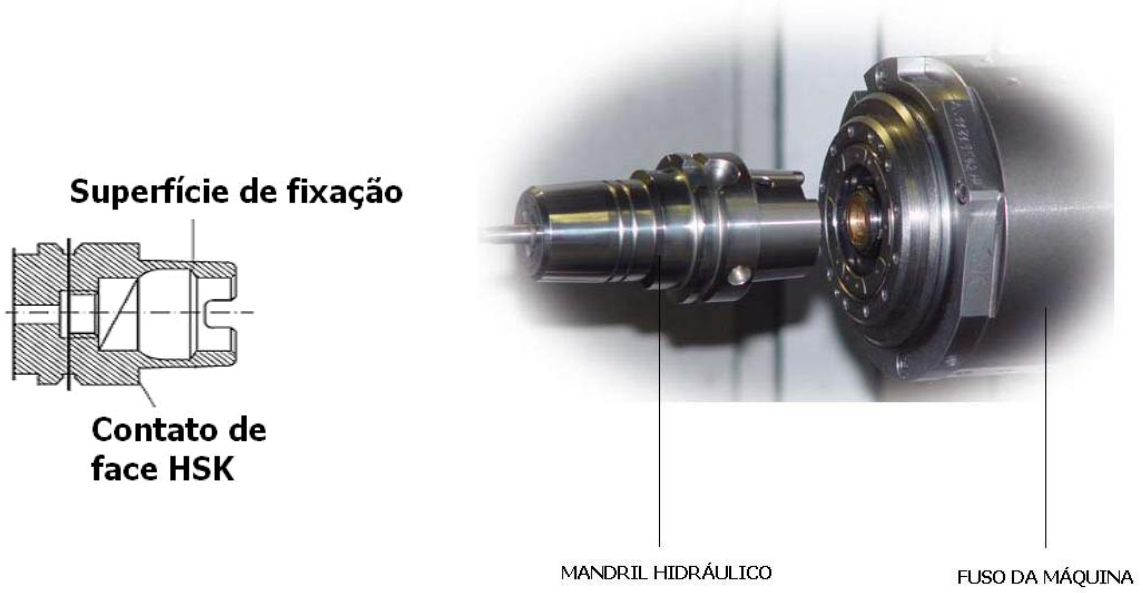


Figura 4: Sistema de fixação HSK e fuso da máquina (GUHRING, 2005).

medida que a velocidade aumenta, a força centrífuga faz com que as garras se expandam, pressionando o cone contra a parte interna do eixo-árvore, assegurando o contato.

O sistema de fixação hidráulico apresenta uma bucha de dilatação cilíndrica deformável que, ao se injetar óleo na interface da bucha com a ferramenta mediante um êmbolo ativado por parafuso, provoca a dilatação da bucha de forma centralizada em direção à haste da ferramenta. Esse sistema apresenta como desvantagem erro de concentricidade de fixação da ordem de 5μm, queda de pressão da coluna de óleo, haste da ferramenta deve ser cilíndrica e uniforme e custo elevado para o processo, comparando-se a qualquer outro sistema de fixação.

A Figura 5 mostra a parte interna de um sistema hidráulico com o êmbolo e o parafuso acionador (GUHRING, 2005).

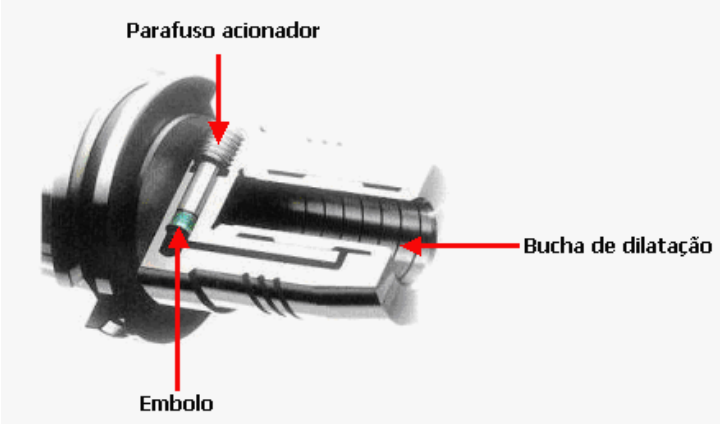


Figura 5: Sistema de fixação hidráulico, mostrando o parafuso acionador e o êmbolo de pressão do óleo (GUHRING, 2005).

Os sistemas de fixação por contração térmica utiliza o princípio da dilatação dos corpos quando aquecidos. Para a fixação, o mandril é aquecido e dilata-se montando com interferência de (0,025mm a 0,050 mm) no cilindro. A centralização da ferramenta fica assegurada após o resfriamento do mandril. O aquecimento necessário pode ser obtido por ar quente, chama aberta ou indução elétrica (FIEDLER; WURZ, 2001).

Este sistema apresenta excelente concentricidade e rigidez. Além disso, permite uma transmissão de torque máxima com os mandris perfeitamente simétricos. Não são necessários parafusos para acionar cilindros hidráulicos ou fixar a ferramenta, permitindo que sejam fabricados com níveis muito baixos de desbalanceamento com erro de concentricidade da ordem de 4µm (ARNOME, 1998). Sua desvantagem está na baixa flexibilidade, dificuldade na troca de ferramentas, maior custo de implantação do sistema em razão da aquisição da máquina de aquecimento (SCHULZ; HANSER; VERLAG, 1996) (Figura 6).

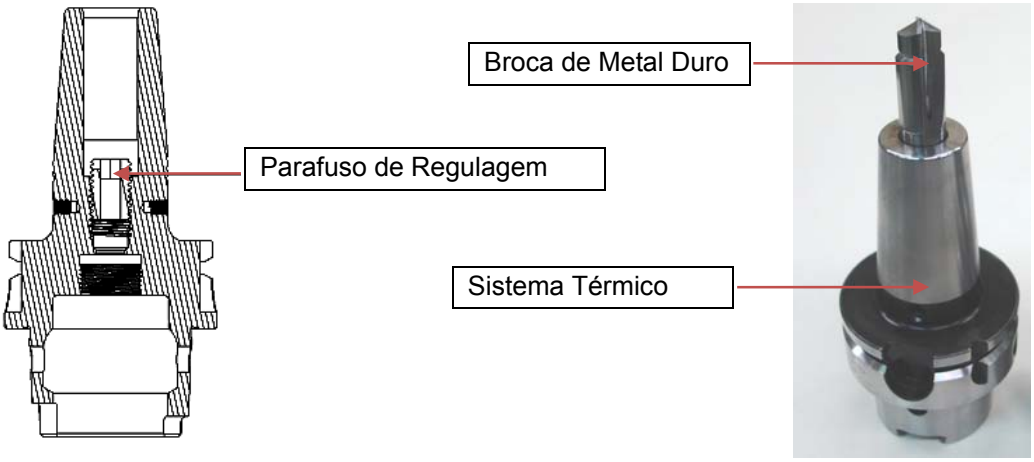


Figura 6: Sistema de fixação térmico com o cilindro interno e a face HSK intercambiável (KELCH, 2004).

Os sistemas hidráulico e térmico realizam as operações de alargamento, fresamento, furação, enquanto que a operação de rosqueamento não é feita pelo sistema de fixação por contração térmica. As condições de rigidez para um sistema de fixação devem ser levadas em consideração, dentre os processos de usinagem.

O sistema térmico apresenta melhor rigidez que o hidráulico devido ao processo ser por montagem de componentes mecânicos por interferência térmica e não por pressão hidráulica. O material mais utilizado na fabricação de mandris térmicos é o aço ferramenta AISI H13 para trabalho a quente, boa usinabilidade e estabilidade dimensional no tratamento térmico. É pouco sensível aos choques térmicos que ocorrem em ferramentas refrigeradas à água (H13).

Tabela 1: Composição química média aço AISI H13.

Elemento %	C	Si	Cr	Mo	V
AISI H13	0,40	1,00	5,00	1,50	1,00

Após a caracterização dos sistemas de fixação, descreve-se a seguir, a formação do cavaco na furação e como esta formação afeta o desgaste da ferramenta no processo de furação.

2.6 Formação de cavaco

Entende-se por cavaco a porção de material que é removida da peça e a sua formação influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte, entre outros. O cavaco é o resultado final da imposição da ferramenta cortante sobre um determinado material, e a sua formação foi proposta por diferentes autores (TRENT, 2000 e descrito por SALES; SANTOS, (2003) além de MACHADO; SILVA, 1999).

A Figura 7 mostra a variação do ângulo de inclinação (λ) e do ângulo de saída (γ) em função da distância do centro da broca para a sua extremidade.

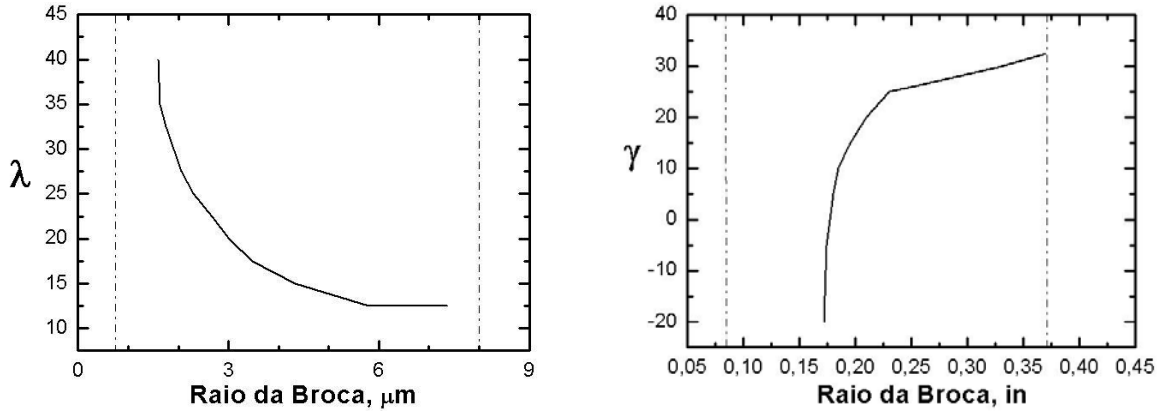


Figura 7: Variação dos ângulos de inclinação e saída em relação ao raio da broca (SHAW, 1984).

Os cavacos na furação são inicialmente gerados no centro da broca. O movimento do centro da broca é mais lento na face de corte em relação a sua extremidade. Em virtude da variação dos ângulos λ e γ com o raio da broca, tem-se que o cavaco formado na região mais próxima do centro da ferramenta é mais curto do que aquele formado na região externa da broca. Esta diferença no comprimento do cavaco força o seu fluxo para o centro da ferramenta em vez de ser perpendicular à face de corte. Além disto, a parte central da hélice da broca força o enrolamento do cavaco, apresentado forma espiral (Figura 8).

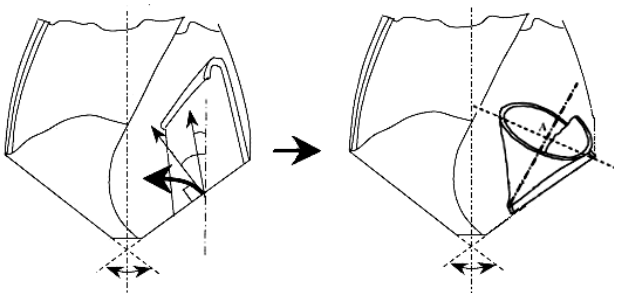


Figura 8: Representação esquemática das formas iniciais do cavaco formado em uma broca (KE et al, 2005).

Entretanto, quando o cavaco espiral move-se por sobre a hélice, esta forma só se manterá se houver uma rotação constante em relação ao seu próprio eixo.

Este movimento rotacional é dificultado com a evolução da usinagem, ou seja, em relação à profundidade do furo e a interação da hélice da broca com a parede do furo. Assim, se o movimento rotacional não se mantiver, o cavaco pode se quebrar ou mudar de forma (KE, 2005). Neste modelo, (TRENT; WRINHT, 2000) afirmam que a trinca se inicia na ponta da ferramenta, devido às tensões trativas neste local.

Um segundo modelo foi construído para a descrição da formação do cavaco na usinagem de aço em máquinas de usinagem de alta velocidade. Nestas máquinas, a ferramenta utilizada é bastante negativa (γ = -26º) com o centro da broca. (POULACHON, 2002) afirmam que os níveis de constrição mais elevados se encontram numa região ao redor do raio da ferramenta, enquanto que na superfície da peça antes do “chanfro” gerado pela ferramenta a constrição desaparece. Os baixos níveis de tensão de compressão abaixo da superfície provocam a abertura de uma trinca que se desenvolve em direção à superfície (FACCIO, 2002). A nucleação da trinca ocorre próximo à superfície externa do cavaco na zona de cisalhamento primária (Figura 9).

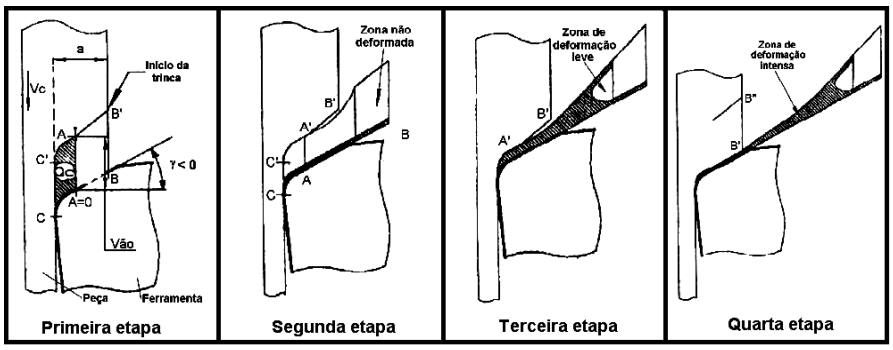


Figura 9: Etapas descritivas de formação de cavaco (FACCIO, 2002).

Para a primeira fase da formação de cavaco, a trinca se forma rapidamente e se desenvolve seguindo o ataque da ferramenta. Seu comprimento relativamente importante corresponde à parte do cavaco que não foi submetida a nenhuma distorção (FACCIO, 2002).

Informações sobre o processo de corte podem ser obtidas estudando a área do cavaco. A aresta postiça (APC), uma porção de material encruado ligado à da superfície de saída ferramenta foi estudada para revelar os efeitos de condições diferentes no processo de corte tais como velocidade de corte, velocidade de avanço e geometria da ferramenta.Geralmente, um elevado valor do coeficiente de atrito entre o cavaco e a face da ferramenta é a razão para a formação da aresta postiça.

A aresta postiça de corte nasce na forma de embrião na raiz do cavaco, e cresce com a continuidade do processo de corte. A (Figura 10) mostra as forças de atrito na aresta postiça, f_{CB} na face de contato entre o cavaco e a aresta postiça, e o f_{BT} na face de contato entre aresta postiça e a ferramenta. Ambas as forças atuam na aresta postiça e trabalham como um binário de cisalhamento da aresta postiça.

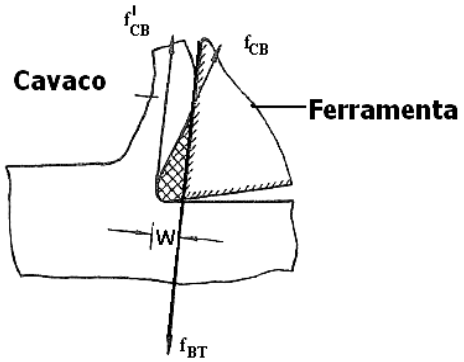


Figura 10: Binário cisalhante que atua em uma aresta postiça (Venkatesh, V.C., 1996).

Com o crescimento da aresta ou aumento do valor de w, o binário cresce até que a aresta seja cisalhada. Posteriormente, a aresta postiça cresce novamente, assim as forças de corte são gradualmente crescentes com o crescimento da aresta postiça, e, rapidamente,decrescem com a perda da aresta postiça. As forças de corte alcançam valores máximos e mínimos, respectivamente, antes e depois da perda da aresta postiça. A diferença entre os valores máximos e mínimos depende do tamanho da aresta postiça, do w, e do tempo de crescimento da aresta postiça.

Por outro lado, desde que a face de corte é substituída pela aresta postiça, a ferramenta é protegida do desgaste até um certa extensão. (VENKATESH, V.C,

1996) verificaram que brocas com ângulo da ponta negativo produziram menor aresta postiça e furo de melhor qualidade.

Durante o processo de furação, o fator mais importante que afeta o desempenho da ferramenta de corte e propriedades da peça é a temperatura de corte entre a broca e cavaco. A temperatura de corte afeta diretamente a qualidade do furo, rugosidade, desgaste da ferramenta e limita o aumento na velocidade de corte. As condições térmicas na furação diferem significativamente dos outros processos tais como torneamento. O cavaco é formado no fundo do furo e permanece em contato com a broca em uma longa distância,aumentando a temperatura da ferramenta. As temperaturas da ferramenta aumentam com a profundidade do furo. Temperaturas crescentes e o acúmulo de cavacos aquecidos no fundo do furo são sérios problemas em furação e, muitas vezes, requerem refrigerante pressurizado bombeado através da broca para garantir adequado resfriamento e saída do cavaco (COTTERELL, 2002). Para controlar a furação a seco de ligas de alumínio é necessário limitar a geração de calor que ativa a difusão química entre o cavaco e a ferramenta e facilitar a remoção de cavaco da área de corte.A fonte de calor é produzida na zona de cisalhamento primária (C), na zona de cisalhamento secundária (A) e, por último, onde ocorre o atrito entre a ferramenta e a superfície da peça (B) (Figura 11). O calor gerado afeta parte do flanco (superfície de incidência) da ferramenta e toda a superfície usinada da peça.

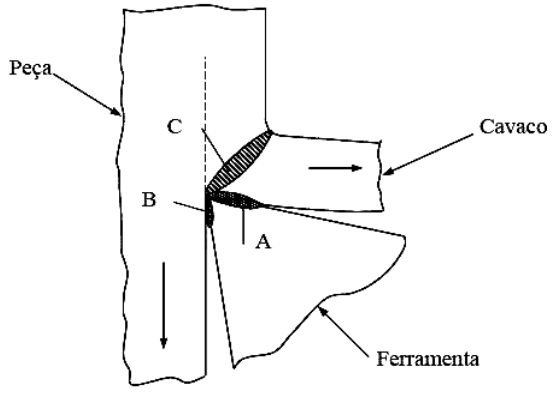
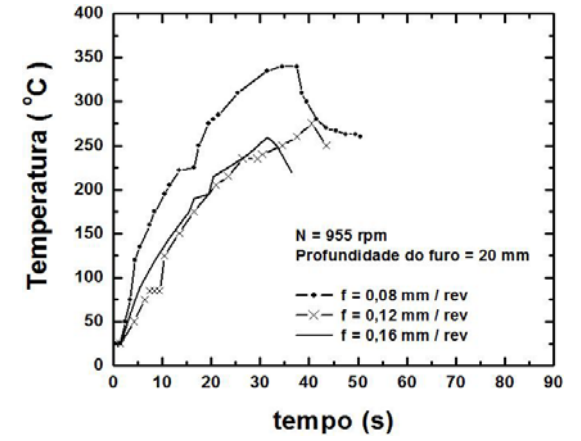


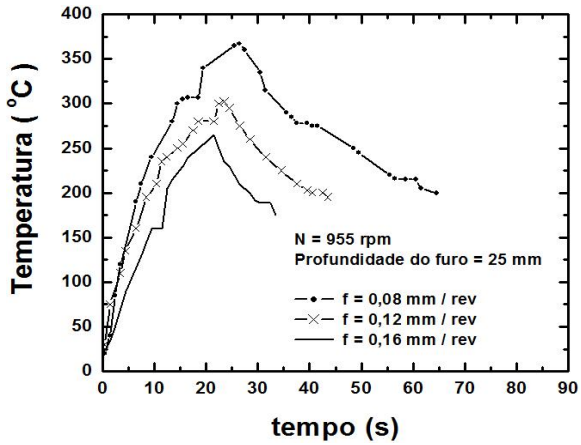
Figura 11: Principais fontes de geração de calor na formação do cavaco (FERRARESI, 1997).

A evolução da temperatura da broca na furação a seco pode ser medida pela inserção de termopar através dos furos de lubrificação da broca. A (Figura 12) mostra os efeitos da velocidade de avanço,profundidade de corte na resposta da

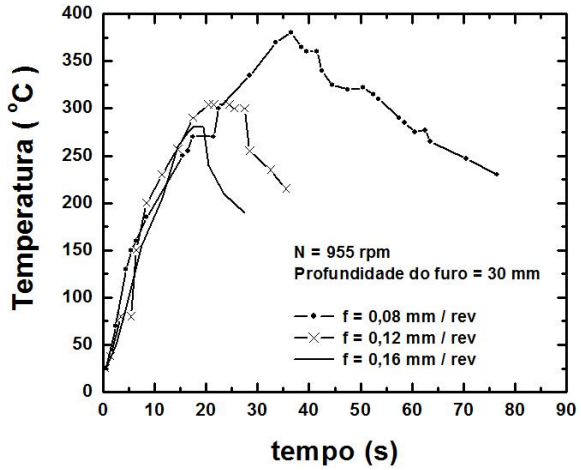
temperatura da broca durante o processo de furação a seco para o alumínio Al 7075-T651.



(a)



(b)



(C)

Figura 12: Efeitos de diferentes profundidades e velocidade de corte nas temperaturas da broca HSS na furação de liga AI-Si 1040 (a, b e c). (OZCELIK.; B, 2006).

As temperaturas crescem com o aumento da profundidade do furo para a mesma velocidade de avanço e velocidade de eixo (OZCELIK, B, 2006). (NOUARI, M, 2003) mostraram que a máxima temperatura na face de corte da broca é uma função crescente da velocidade de corte e da velocidade de avanço. É provável que a elevação da velocidade de avanço induziu o crescimento do comprimento de contato entre a ferramenta e cavaco, e, conseqüentemente, eleva a temperatura da interface. Assim, para otimizar o processo de corte, todos o parâmetros que afetam a temperatura (velocidade de corte, velocidade de avanço, comprimento de contato, tipo de broca e coeficiente de atrito) devem ser levados em consideração.

(NOUARI, 2003) calcularam o efeito da velocidade de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta em furação a seco da liga de alumínio AA 2024 com broca WC-Co. Para v_c=25m/min, a máxima temperatura foi de 80°C, enquanto que para as velocidades de 65 e 300m/min, estas temperaturas máximas foram, respectivamente, de 125 e 220°C (Figura 13).

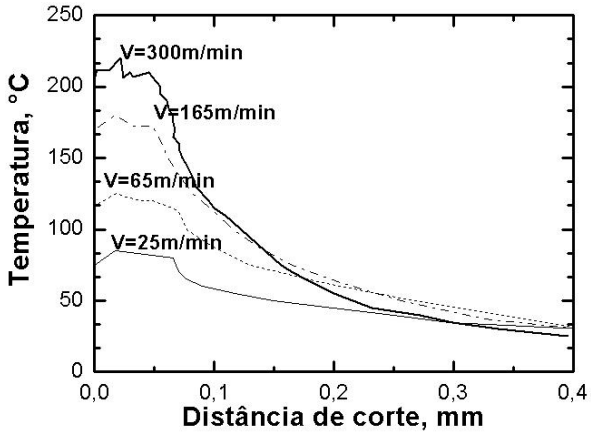


Figura 13: Distância da extremidade cortante em mm (Nouari., M, 2005).

Bono et al, (2001) desenvolveram um modelo em elementos finitos para prever os efeitos da distorção térmica no diâmetro e cilindricidade dos furos. Este modelo previu que a expansão térmica da broca é o efeito dominante e provoca furos cujos diâmetros aumentam com a profundidade com desvios de 0 a 26μm.

Este desvio foi inferior ao observado experimentalmente (100μm) em razão da vibração da máquina e broca, rotação e desalinhamento no corte na entrada da broca. A temperatura na interface cavaco-ferramenta tem uma influência importante no desgaste da ferramenta e microestrutura da região de deformação(King, A.A, 2005).

2.7 Desgaste de ferramenta

Desgaste de ferramenta durante o corte não somente diminui a vida da ferramenta, mas, também, leva a deterioração da qualidade da peça, induz tensões residuais e alterações de microestrutura, etc. A condição tribológica da interface cavaco-ferramenta é controlada pelo crescimento da interface, que origina a adesão e fricção. Adesão se define como uma medida da resistência ao escoamento da interface, isto é, a tensão necessária para comprimir as asperezas e conduzi-las ao estado plástico. Fricção é uma medida da resistência ao cisalhamento da interface, isto é, a tensão necessária para cisalhar as asperezas causando movimento relativo na interface. Desgaste abrasivo predomina, quando as condições na interface cavaco-ferramenta são de escorregamento (AMORIM, 2002). Adesão fraca entre a ferramenta e a peça causa desgaste adesivo pela remoção mecânica do material da ferramenta quando as junções adesivas são quebradas e o cavaco flui sobre a ferramenta (desgaste por atrito). A deposição de metal na região de desgaste no flanco da ferramenta durante a usinagem é um fenômeno comum especialmente em aços recozidos e em liga de alumínio. A causa do depósito de metal não está elucidada e as características da região do desgaste e o do depósito não são conhecidas. O desgaste de flanco de uma ferramenta de corte tem efeitos deletérios na integridade superficial incluindo acabamento superficial, tensão superficial e alterações microestruturais. É difícil obter bom acabamento superficial quando o depósito acumula na superfície da região de desgaste.

Define-se travamento entre duas superfícies em movimento relativo como uma solda em fase sólida entre ligações atômicas primárias de superfícies absolutamente limpas (SUBRAMANIAN; S.V, 2002).

Quando travamento ocorre, há intenso cisalhamento localizado, levando à deformação termoplástica de cisalhamento de uma fina camada do material do cavaco adjacente à interface cavaco-ferramenta, conhecida como zona de cisalhamento secundária ou zona de fluxo.As elevadas temperaturas resultantes na interface cavaco-ferramenta causam desgaste de dissolução da ferramenta no material do cavaco. O desgaste de dissolução se caracteriza pela rápida formação de cratera na face de corte da ferramenta que, após amaciamento da aresta de corte, leva a falha catastrófica da ferramenta por deformação plástica ou lascamento

da aresta de corte. (ERTUNC; OYSU, 2004) definem o desgaste como uma perda de material progressiva nas faces de corte da broca, devido à interação física entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho. Depois de um certo limite, o desgaste da ferramenta pode causar uma falha catastrófica com considerável prejuízo na peça e mesmo na máquina ferramenta. O desgaste altera a geometria original da ferramenta de corte, modificando a área de contato na interface cavaco-ferramenta. Como conseqüência, várias outras modificações irão surgir, sendo as mais importantes: o aumento na geração do calor, o aumento das forças de usinagem e a elevação da deformação plástica (MACHADO; SILVA, 2003). As formas de desgaste mais comuns incluem: desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe.

(ABU-MAHFOUZ.; I, 2003) induziram cinco tipos de desgaste artificialmente na ponta da broca:

Transversal – ocorre devido a elevado cisalhamento e tensões compressivas na zona de fluxo da interface ferramenta-peça atuando em elevadas temperaturas que causam erosão da aresta transversal.

Cratera – desgaste na face de corte de uma aresta de corte. É devida a elevadas temperaturas ao longo da superfície de corte.

Flanco – desgaste nos dois flancos ou folgas nas faces de corte.

Fratura ou quebra - em um gume da aresta de corte.

Desgaste do ângulo de corte – devido a elevado atrito e forças de impacto entre a broca e as paredes do furo usinado (Figura 14).

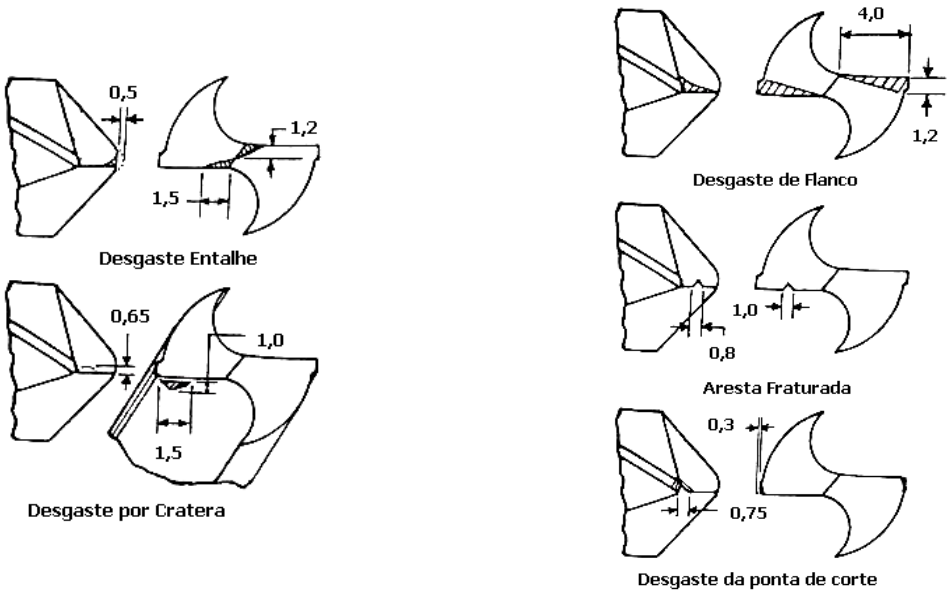


Figura 14: Cinco tipos de desgaste de uma broca induzidos artificialmente dimensões em mm do desenho não estão na escala (APC-MAHFOUZ.; I, 2003).

Foi mostrado que o desgaste da ferramenta é devido à abrasão em condições de menor velocidade de corte, e o dano é causado pela adesão do material usinado na superfície da ferramenta. Na usinagem da liga de alumínio, a adesão aparece pela formação da aresta postiça (APC), que cresce podendo acumular fragmentos de material da peça e alterar o diâmetro do furo.

Quando se aumenta a velocidade de corte, a temperatura da face de corte se eleva em razão das deformações associadas na zona primária de cisalhamento e aos efeitos do atrito ao longo da interface cavaco-ferramenta.

Conseqüentemente, a difusão é o mecanismo de deformação dominante para ferramentas em temperaturas de corte elevadas. O material transferido em direção ao cavaco leva a formação de uma camada de adesão e uma aresta postiça de corte ou à formação de uma cratera na face de corte em condições extremas de corte. Análise de desgaste tem tradicionalmente enfatizado desgaste de flanco mais que desgaste de cratera, em virtude da sua influência na qualidade do furo (NOUARI, M, 2005).

O mapa dos mecanismos de desgaste é uma ferramenta poderosa na escolha e seleção dos parâmetros tribológicos. (ZHANG, M.Z, 2001) definiram quatro regiões separadas por contornos de intervalo de 0,3 ($\log_{10}$ VB/distância de corte) na furação a seco de liga Al-Si fundida sob pressão com broca de aço rápido (Figura 15). Neste

mapa, há a zona de corte de menor desgaste para a broca de aço rápido na furação de liga Al-Si.

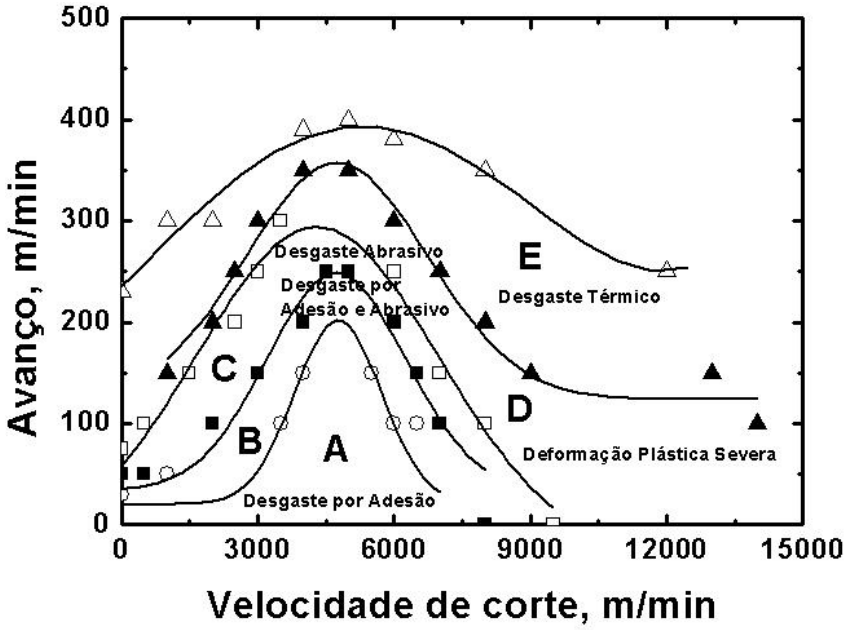


Figura 15: Mapa de desgaste para ligas Al-Si em processo de furação a seco (ZHANG.; M.Z, 2001).

Durante o procedimento de progressão do desgaste, as forças de corte aumentam, a temperatura da ferramenta se eleva, a broca se deforma e há uma perda imediata das faces afiadas da ferramenta (ERTUNC; OYSU, 2004). Diferentes técnicas foram utilizadas para se medir o desgaste da broca ao longo do processo de furação.

(LIN, K.L,.1997) determinaram a vida da broca, quando a broca foi incapaz de penetrar na amostra de chapa de aço. (ZHANG, M.Z, 2001) determinaram o desgaste pela medição do comprimento de VB_{max} no flanco da aresta de corte através de microscópio de varredura, enquanto que (BRAGA, D.U, 2002) utilizaram microscópio ótico com 25 e 50 vezes de aumento. (TEER, D.G, 2005) mostram que a avaliação do desgaste através da aresta de corte foi impedida pelo material aderido e, neste caso, a avaliação do desgaste foi feita após ataque com solução de 10% NaOH em microscópio de varredura, enquanto que (BHOWMICK, S, 2008) mediu a altura da aresta postiça pela linha perpendicular à aresta de corte da broca. (SUNDARARAJAN., G, 2008) dividiu o comprimento do flanco em regiões para cada uma das duas arestas de corte. O desgaste de flanco foi obtido através da média

aritmética das medidas de 4 pontos realizados ao longo das arestas de corte (Figura 16).

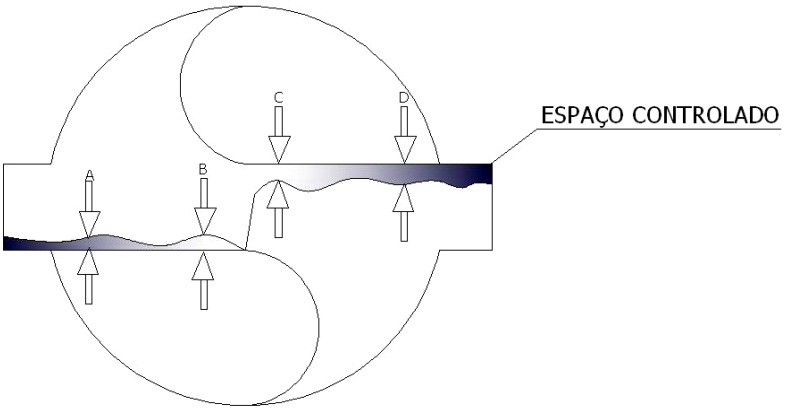


Figura 16: Diagrama esquemático da broca mostrando método medição do desgaste flanco. (A + B + C + D) / 4 (SUNDARARAJAN., G,.2008).

Quando o desgaste do ângulo de corte alcançou 66% da largura da aresta total, considerou-se que a broca falhou (Figura 17).

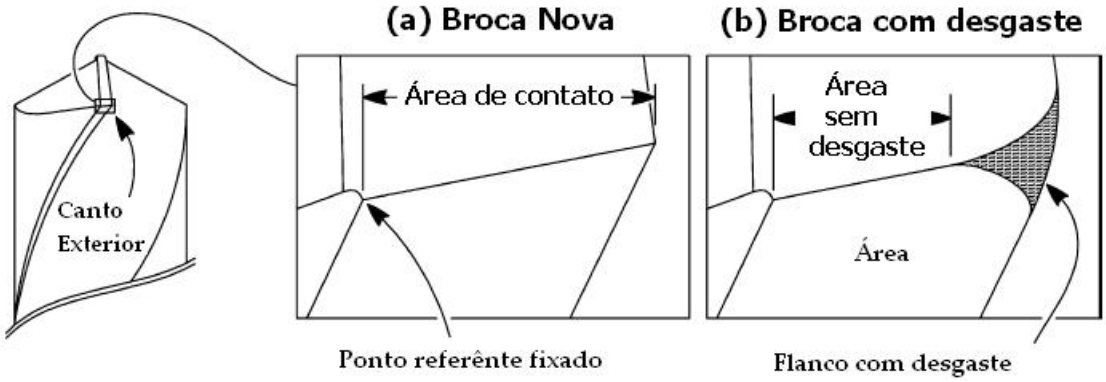


Figura 17: Desenho esquemático, método utilizado para medir o desgaste exterior na quina do flanco a partir de um ponto de referência fixo (A. Ber, S. Kaldor,1982).

O desgaste de flanco máximo, (VB_{Max}), igual a 0,6 mm, no caso do desgaste não ocorrer de forma regular ao longo do flanco (Figura 18).

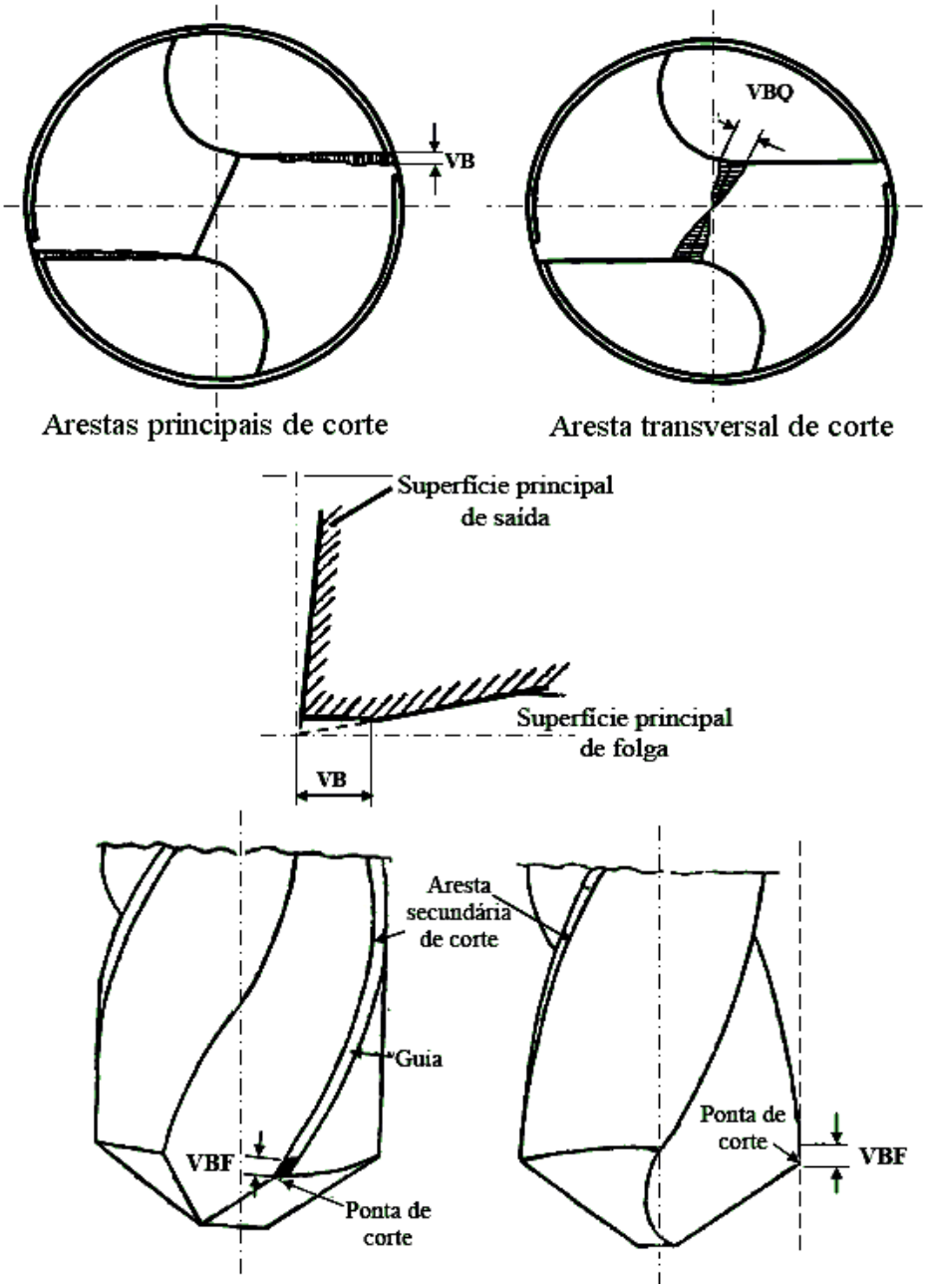


Figura 18: Desenho esquemático do desgaste da broca helicoidal (ARENAS, 2003).

Em qualquer estudo de usinagem, entender os mecanismos de desgaste que ocorre na aresta de corte é crítico. Na furação, esta consideração não é importante nos estágios finais do desgaste que precedem falhas catastróficas, mas, também, através da vida da broca. O progresso do desgaste de flanco na furação segue um modelo de três estágios no qual o desgaste no primeiro estágio resulta em rápida elevação nos primeiros segundos de corte e redução, posteriormente, para manter uma taxa constante no segundo II (Figura 19). No último estágio, o desgaste avança

por um mecanismo adesivo em uma taxa que é linear com o tempo de corte (Quick, D. et al., 2003).

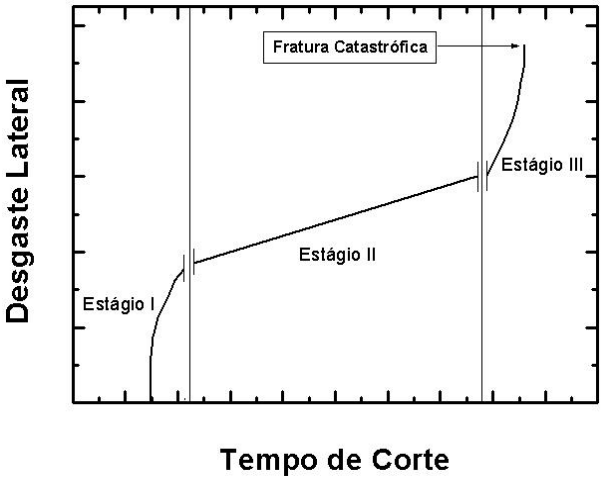


Figura 19: Diagrama esquemático de um modelo de uso de três fases de desgaste de uma broca HSS (Quick, D, 2003).

2.8 Fluidos de corte

Nos processos de usinagem, os fluidos de corte desempenham numerosas funções, contribuindo para o atendimento das exigências de fabricação.

A diversificação de fluidos de corte com distintas finalidades levou ao surgimento de diferentes classificações, dificultando a padronização destas classificações (BOOSER, 1988; KÖNIG, 1990; EDWARDS, 1993; DINIZ, 1999).

Dentre as funções do fluido de corte têm-se a redução do desgaste da ferramenta, melhoria do acabamento superficial do componente, refrigeração e lubrificação da interface peça/ferramenta de corte/cavaco, minimização dos efeitos da formação da aresta postiça de corte, proteção da peça usinada, ferramenta de corte e máquina-ferramenta contra corrosão e transporte do cavaco para fora da região de corte (FERRARESI, 1977; ARMAREGO; BROWN, 1967; KLOCKE; EISENBLÁTER, 1997; SILLIMAN, 1992; DINIZ, 1999).

Para atender a essas exigências, os fluidos de corte devem possuir características específicas como capacidade de absorção de calor (isto depende da viscosidade, calor específico, condutividade térmica e, em certo grau, do calor latente de vaporização), boas propriedades anti-fricção, estabilidade durante seu uso

e, também, no armazenamento, ausência de odores desagradáveis, não formação de fumaça e transparência, de modo que a peça possa ser observada durante as operações de usinagem, etc. A aplicação de fluidos de corte convencional cria diversos problemas técnico-ambiental tais como:

- poluição ambiental devido à formação de gases em temperatura elevada;
- riscos biológicos aos operadores do crescimento de bactérias;
- necessidade de sistemas adicionais para bombeamento, armazenagem, filtragem, reciclagem e resfriamento, etc;
- disposição dos fluidos gastos com riscos de poluição de água e contaminação do solo;
- porcentagem elevada do custo do fluido no custo global de fabricação (17% em alguns casos) e elevado custo de reciclagem.

Atualmente, existe uma tendência de se minimizar a aplicação de fluido de corte em sistemas de usinagem. As técnicas de corte a seco e a outra de utilização de mínima quantidade de fluido (MQL- 5-50ml/h) têm provado sucesso na furação de ligas de alumínio, ainda que, na furação, o fluido de corte deva remover os cavacos de dentro do furo, evitando, assim, a quebra da ferramenta (BHOWMICK,S., ALPAS, A.T. 2008). (BRAGA, 2002) concluíram que os furos obtidos com o sistema MQL apresentaram qualidade similar ou melhor que os obtidos com óleo solúvel abundante, e , também, a broca de carbeto revestida com diamante com a condição MQL não apresentou qualquer vantagem, quando comparada à broca não revestida K10 na furação de liga Al-Si.

A usinagem a seco pode necessitar a utilização de ferramenta de corte de melhor qualidade, modificação da geometria da ferramenta e o uso de revestimento para fornecer proteção contra o desgaste e /ou lubricação (RENEVIER, N.M, 2004; KALIDAS., S, 2001). A ferramenta deve suportar ambiente extremos que incluem altas temperaturas, elevadas forças de corte e cargas mecânicas. Ela deve possuir elevada dureza a quente, elevada refratariedade e baixo coeficiente de atrito. A demanda por baixa condutividade térmica e coeficiente de atrito na ferramenta em operações de furação a seco tem necessitado o desenvolvimento de revestimentos multicamadas. Estes estudos têm ajudado sobremaneira à realização da furação a seco, contribuindo no aumento de vida útil da ferramenta e na qualidade do produto.Revestimentos tradicionalmente duros baseados em nitretos, incluindo TiN,

TiCN e AlN estão entre aqueles que têm demonstrado desempenho tribológico inaceitável contra ligas de alumínio (ALPAS, A.T et al. 2008). (TEER, 2005) testaram brocas NH-DLC, H-DLC , MoS_2 contendo revestimento de Ti e TiB_2 - durante a furação a seco do alumínio fundido A319 (6% Si, 3,5% Cu) em ar soprado diretamente na ferramenta.

Revestimento NH-DLC exibiu vida de ferramenta prolongada (superior a 400 furos) que aumentou por um fator de 7 e 3 quando comparado, respectivamente, com broca de aço rápido sem e com revestimento H-DLC. Adicionalmente, menor aresta postiça se observou durante a furação com broca revestida com NH-DLC.

2.8.1 Classificação dos fluidos de corte

A água apresenta alta taxa de evaporação, deficiência em lubrificar a região de corte e, também, provoca corrosão nos materiais ferrosos. Foi substituída por óleos integrais e óleos emulsionáveis. As emulsões (água com partículas de óleo em seu interior) combinam propriedades lubrificantes e anti-oxidantes dos óleos com as propriedades refrigerantes da água. A faixa de concentração da emulsão é ampla, e as emulsões são utilizadas em operações de alta velocidade de corte, baixas pressões, cortes leves e moderados em materiais de fácil usinabilidade (FERRARESI, 1977; EL BARADIE, 1996). Em óleos emulsionáveis, adiciona-se os emulsificadores que reduzem a tensão superficial na interface óleo-água. Sulfonatos de sódio de base mineral ou sintéticos são utilizados como agentes emulsificadores.

Os fluidos de corte se classificam em gasosos, aquosos e oleosos (MACHADO; DINIZ, 2000). O ar é utilizado para remoção dos cavacos da região de corte e refrigerar. Pode-se utilizar ar comprimido com o fluxo direcionado à zona de corte com a finalidade de remover calor e facilitar o arraste de cavaco. Outros gases tais como Ar, He, CO_2 e N_2, também, são utilizados em aplicações especiais (FERRARESI, 1977; DROZDA; WICK, 1983; EL BARADIE, 1996; SILLIMAN, 1992).

As emulsões apresentam vantagens em relação ao óleo mineral puro tais como maiores taxas de redução do calor permitindo maiores velocidades de corte, condições mais limpas no ambiente de trabalho, economia, benefícios quanto à segurança e saúde do operador, não apresentam risco de incêndio e reduzem a

geração da névoa de óleo (emissão de hidrocarboneto) (DROZDA; WICK, 1983; EL BARADIE, 1996).

A seleção apropriada de um fluido de corte é um fator que é algumas vezes negligenciado na prática de usinagem. O critério técnico do processo de usinagem deve, também, influenciar na escolha de um fluido de corte particular. Estes critérios incluem as tolerâncias desejadas, acabamento superficial e consumo de energia.

Muitos fluidos de corte usados com sucesso na usinagem de materiais ferrosos não são convenientes para ligas de alumínio pelas seguintes razões:

- as ligas de alumínio, quando usinadas, desenvolvem rapidamente um filme de óxido de alumínio duro e, assim, destrói a aresta de corte. O fluidos de corte para o alumínio devem ter aditivos que removem esta camada de óxido;
- as ligas contêm silício que as tornam adesivas, promovendo soldagem do cavaco e aresta postiça com o aquecimento;
- alumínio e suas ligas têm um dos mais altos coeficientes de expansão térmica entre os metais e elasticidade elevadas. O fluido de corte deve ser capaz de rapidamente dissipar calor, porque, ao contrário, poderia haver expansão com falha no dimensional da peça.

Fluidos de corte têm um papel mais crítico na remoção do calor da zona de corte nas operações de corte em operações de furação que no torneamento e fresamento. Há diferentes maneiras de garantir uma temperatura crítica que preserva a integridade da peça e produz ferramentas estáveis sob o ponto de vista de desgaste tais como testar formas alternativas de lubrificante, refrigerantes com maior estabilidade química e métodos diferenciados de aplicação, e ferramentas e material da peça bem adequados. Um desenvolvimento recente neste contexto é o uso da névoa de CO_2 e nitrogênio líquido como refrigerantes na usinagem. Essa tecnologia tem proporcionado vida mais longa da ferramenta, maior velocidade de corte, melhor produtividade e menor custo de produção (DHAR, N.R, AMRUZZMAN, M.D., SOUMITRA, P, 2006).

2.9 Parâmetros geométricos

Segundo Gonçalves (2001), a medição é empregada para monitorar, controlar ou investigar um processo ou fenômeno físico. A qualidade, a segurança e o controle de um processo são assegurados através da medição. O resultado de uma medição é uma faixa de valores associado a uma unidade de medida, onde o valor verdadeiro está compreendido nesta faixa.

Neste trabalho, são avaliados o desgaste da ferramenta de corte, a tolerância dimensional e a rugosidade superficial do cabeçote. Alguns parâmetros de medição utilizados são discutidos a seguir.

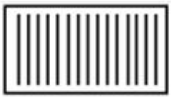
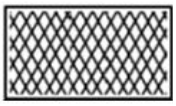
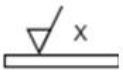
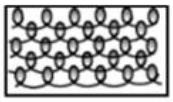
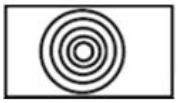
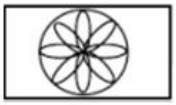
2.9.1 Rugosidade

A rugosidade superficial são imperfeições contidas em uma superfície, podendo ser mensurada com recursos e equipamentos apropriados. A importância do acabamento aumenta, quando cresce a precisão de ajuste entre as peças. Uma menor tolerância de ajuste não é suficiente para garantir a funcionalidade do par acoplado.

Segundo Oliveira (2004), quando as superfícies são observadas com recursos apropriados, elas apresentam irregularidades. As orientações (sentido) das irregularidades dependem do tipo de processo que deu origem à superfície. Deve-se salientar que as superfícies reais de engenharia são compostas do perfil sem filtragem, ou seja, compostas de forma, ondulação e rugosidade.

Segundo Whitehouse (1994), a maneira de analisar uma superfície está relacionada às orientações dos sulcos provenientes do processo de fabricação. As marcas originadas por processos de fabricação se encontram no quadro 1.

Quadro 1: Tipos de acabamento (WHITEHOUSE 1994).

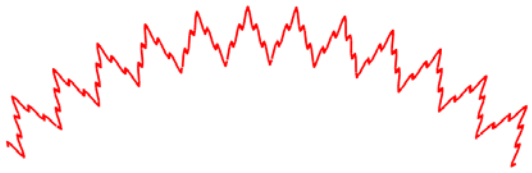
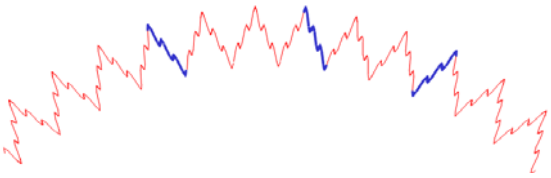
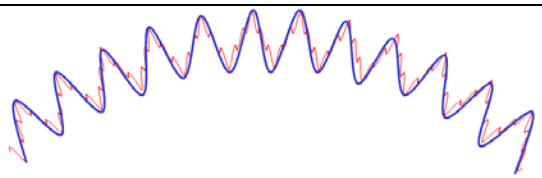
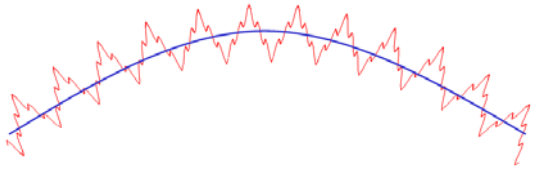
Paralelo		
Perpendicular		
Cruzado		
Multidirecional		
Particular		
Circular		
Radial		

De acordo com Whitehouse (1994), o comprimento e forma do apalpador, o avanço e o ataque do apalpador, as características do amplificador, a precisão do raio a ser medido, e efeitos de filtragem mecânica são algumas das variáveis que podem afetar os resultados de uma medição de superfície.

2.9.2 Processo de filtragem do perfil de rugosidade

Durante a aquisição do sinal do perfil, as freqüências que não fazem parte do perfil são eliminadas por um sistema passa-alta, onde apenas as altas freqüências pertinentes à rugosidade são coletadas.

Quadro 2: Perfil primário decomposto.

	Perfil Primário (P)
	Perfil de Rugosidade(R)
	Perfil de Ondulação (W)
	Forma de Perfil

De acordo com Oliveira, (2006), o processo de filtragem de rugosidade acontece em cinco estágios que são descritos a seguir:

Primeiro estágio: uma linha média é ajustada aos dados do perfil primário, essa linha é determinada aplicando-se um filtro, cujo comprimento de corte é selecionado adequadamente para a análise. A (Figura 20) mostra este primeiro estágio.

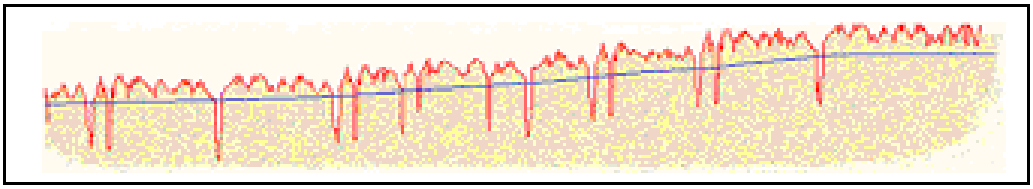


Figura 20: Criação de uma linha sobre a superfície média.

Segundo estágio: as partes de vales do perfil que ficam abaixo desta linha são removidas, as descontinuidades que são criadas nos dados do perfil são preenchidas ao longo da curva da linha média. A (Figura 21) representa o novo perfil após o segundo ajuste e criado um novo perfil a partir do primeiro.

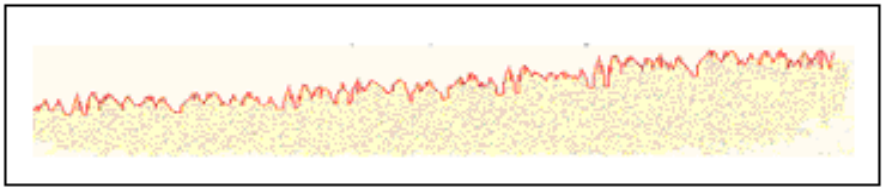


Figura 21: Os vales profundos são retirados e preenchidos.

Terceiro estágio: o mesmo filtro é novamente aplicado aos dados de perfil restantes, a nova linha média obtida é a linha de referência com relação à qual as avaliações dos parâmetros serão executadas. A (Figura 22) mostra o terceiro ajuste.

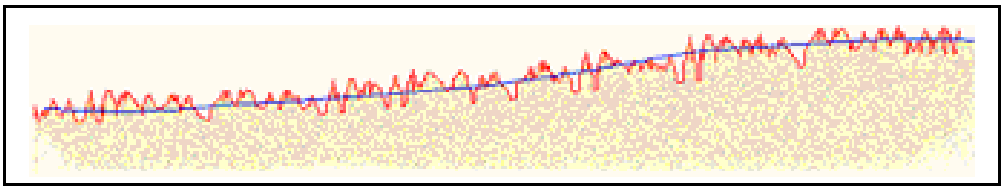


Figura 22: Nova linha média sobre a superfície medida.

Quarto estágio: a nova linha média de referência é transferida para o perfil primário original. A (Figura 23) mostra o novo perfil filtrado.

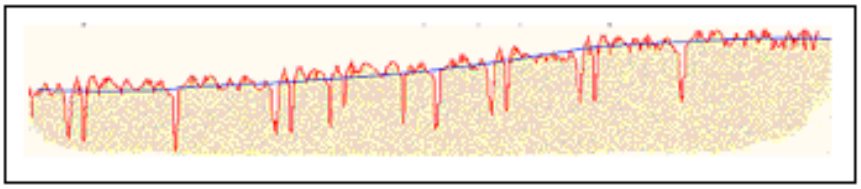


Figura 23: Nova linha média sobre a superfície do perfil primário.

Quinto estágio: o perfil de rugosidade é obtido a partir da diferença entre o perfil primário e a linha de referência. (A Figura 24) mostra o perfil de rugosidade filtrado

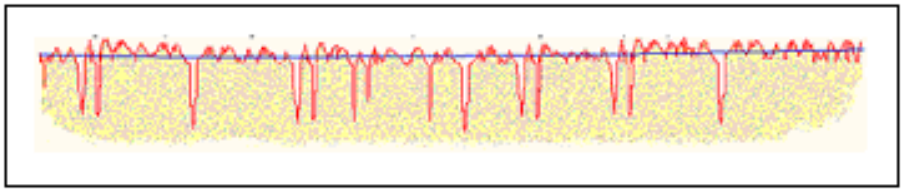


Figura 24: Perfil de rugosidade filtrado em relação ao perfil primário.

2.9.3 Tipos de filtro

Segundo Oliveira, (2004) e Whitehouse, (1994), o modo mais fácil para separar os componentes de sinal em uma base de freqüência é através do uso de filtros. Eles têm a grande vantagem de ajustar em cima de uma curva algum tipo de polinômio.

Segundo Whitehouse, (1994), o filtro opera na forma da onda e conforme a onda é recebida é necessário limpar o sinal antes de poder dar resultados úteis. Assim a quantidade de dados utilizáveis em uma análise está reduzida na eficiência do filtro.

O Quadro 3 representa o sinal capturado pelo apalpador e o efeito da filtragem ISO 2CR e gaussiana. Nota-se que o filtro ISO 2CR, nas saídas de vales, tende a criar falsos picos e estes são incorporados na análise. Já o filtro gaussiano possui a característica de maior estabilidade devido à faixa de corte, com isso falsos picos são retirados da análise.

Quadro 3: Efeitos dos filtros na análise do perfil de rugosidade.

A	Sem Filtro	
B	Filtro ISO 2CR	
C	Filtro Gaussiano	

O filtro ISO 2CR corta a amplitude do perfil em 25%, enquanto o filtro gaussiano corta em 50%.

A função de ponderação para o filtro gaussiano possui a equação de probabilidade gaussiana.

$$f(x)dx = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}\right] e^{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \qquad (2.2)$$

As características de transmissão são estruturadas a partir de dois componentes que são: características de transmissão da linha média e as características de comprimento de onda do perfil. A característica do filtro é determinada a partir da função de ponderação, por meio da transformada de Fourier.

O perfil de rugosidade é a diferença entre o perfil real e a linha média. A característica do filtro é, portanto a diferença entre as características do comprimento de onda do perfil de rugosidade.

Segundo Oliveria, (2004), a quantidade de cut-offs considerado em cada tipo de filtragem não é a mesma. O filtro gaussiano desconsidera metade do primeiro e do último cut-off no comprimento analisado, enquanto o ISO 2CR desconsidera os dois primeiros cut- offs do comprimento analisado.

A (Figura 25) mostra um perfil filtrado simultaneamente pelos dois tipos de filtros.

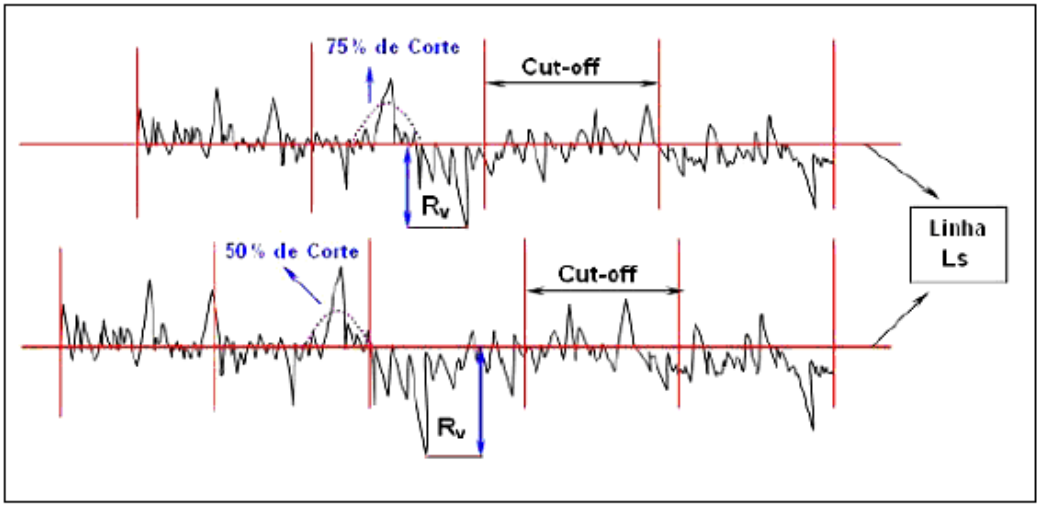


Figura 25: Análise de um perfil com filtragem gaussiana e ISO 2CR de um perfil de rugosidade (OLIVEIRA, 2004).

2.9.4 Análise de forma

Segundo Oliveira (2004), as análises de forma em seções circulares são feitas através da revolução do componente em torno do seu próprio eixo. A sensibilidade da análise é dada conforme a quantidade de harmônicas analisadas em uma revolução.

A quantidade de harmônicas tomadas na análise pode por em evidência características da superfície. Uma análise 1:15 UPR isola a vibração captada em uma revolução e mede apenas os desvios da forma (remove a 60ª harmônica). Já uma análise 15:500 UPR elimina o erro de forma e analisa apenas a vibração contida na revolução (filtra a 8ª harmônica). (A Figura 26) coloca lado a lado para visualização o efeito da filtragem.

(a) Filtro 1:15 UPR (b) Filtro 15:500 UPR

Figura 26: Efeito da filtragem em função da quantidade de harmônicas (WHITEHOUSE, 1994).

De acordo com Oliveira, (2004) e Oliveira, (2006), os filtros ISO 2CR e gaussiano se comportam de forma análoga na análise de forma geométrica. Deve-se levar em conta que a forma geométrica é uma análise macro de uma superfície, enquanto a de textura superficial é uma análise micro da mesma.

2.9.5 Parâmetros de superfície geométrica

A rugosidade média (R_a) pode ser expressa como o desvio médio de um perfil de sua linha ou a distância média de um perfil desde sua linha média, sobre um comprimento médio (Figura 27)

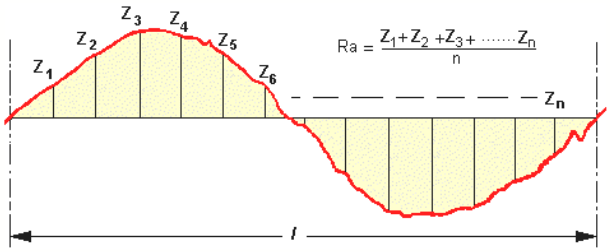


Figura 27: Rugosidade média R_a (WHITEHOUSE, 1994).

Sua aplicação na indústria é muito grande e geralmente é usado no acompanhamento em vários processos de fabricação.

Devido à variação do parâmetro R_a é possível indicar se o processo mudou em alguma variável (velocidade de corte, quantidade de fluidos, etc.) no entanto o Ra é um parâmetro de natureza média.

Dependendo do tipo de processo é ideal que ele seja associado com outro parâmetro. O parâmetro R_a está disponível nos instrumentos mais simples.

Matematicamente a expressão corresponde à equação 2.3:

$$Ra = \frac{1}{l}\int_0^l |Z(x)|dx \qquad (2.3)$$

Esse parâmetro de rugosidade tem a desvantagem de não esclarecer ou caracterizar a variabilidade dos diferentes valores locais da rugosidade sobre o perfil analisado.

Sua aplicação na indústria é grande é usado no acompanhamento em vários processos de fabricação. Devido à variação do parâmetro R_a é possível indicar se o processo mudou em alguma variável (velocidade de corte, quantidade de fluidos, etc).

O parâmetro de rugosidade R_z fornece uma idéia mais clara para a monitoração da variação do acabamento superficial no processo de fabricação.

Comparando-se o parâmetro R_z com R_a, pode-se dizer que o parâmetro R_z é mais sensível às mudanças no acabamento superficial.

R_z (DIN) também conhecido como parâmetro R_{tm} é a média de todos os valores de Z no comprimento de avaliação, onde Z é a altura máxima das rugosidades medidas no comprimento de amostragem (Figura 28).

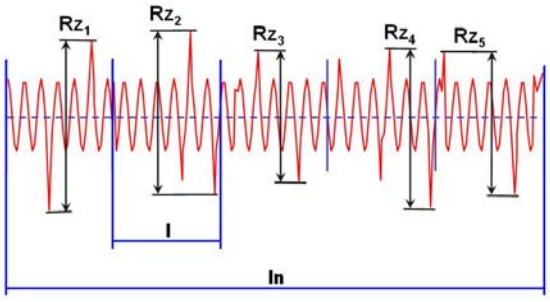


Figura 28: Parâmetro R_z DIN (TAYLOR, 2000).

onde:

ln = comprimento de avaliação

l = Comprimento de amostragem (CUT-OFF).

A equação que define a rugosidade média é a seguinte:

$$(R_z(DIN) = R_{tm}) = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 ... + Z_n}{n} \quad (2.4)$$

A aplicação do parâmetro R_z é bem parecida ao parâmetro R_t, a diferença está na conseqüência de uma amplitude isolada entre pico e vale e na amplitude média entre todos os picos e vales.

A rugosidade R_t corresponde à distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação (ln). Independente dos valores de rugosidade parcial (Z_1), pode-se observar que o pico mais alto está no retângulo Z_1, e o vale mais profundo no retângulo Z_3, ambos configurando a profundidade total da rugosidade R_t (Figura 29).

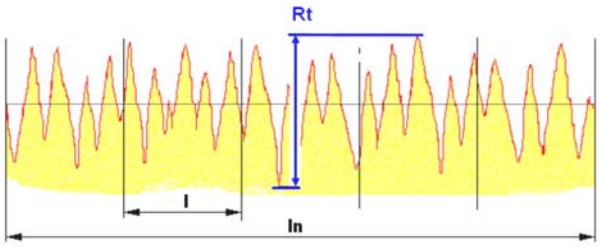


Figura 29: Parâmetro R_t (TAYLOR, 2000).

onde:

ln = comprimento de avaliação

l = Comprimento de amostragem (CUT-OFF).

O emprego do parâmetro R_t vai depender do tipo da superfície. A presença de grandes amplitudes entre picos e vales não é conveniente em sedes de retentores o que torna o R_t o parâmetro mais conveniente para análise desta superfície.

2.9.6 Tolerância geométrica

Desvio de forma das superfícies reais com relação aos geométricos que os definem, micrométricos (rugosidade) e macrométricos (retilineidade, circularidade, cilindricidade e planicidade). O erro de posição tem grau de variação dentre as diversas superfícies reais entre si, com relação ao seu posicionamento teórico. O desvio composto apresenta formas de posição desvios de batimento radial e axial.Tolerância de retilineidade: é a condição pela qual cada linha deve estar limitada dentro do valor de tolerância especificada.

Tolerância de forma de superfície circularidade: o campo de tolerância é limitado por duas superfícies envolvendo esferas de diâmetro igual à tolerância especificada e cujos centros estão situados sobre uma superfície que tem a forma geométrica correta.

A circularidade é uma tolerância de forma macrogeométrica, que tem relação com os diâmetros encontrados na peça quando medida. As diferenças do círculo real para o círculo teórico são genericamente denominadas ovalizações. Tolerância de circularidade é a variação entre duas circunferências do ponto mais afastado do centro, ao ponto mais próximo. O campo de tolerância no plano considerado é limitado por dois círculos concêntricos.

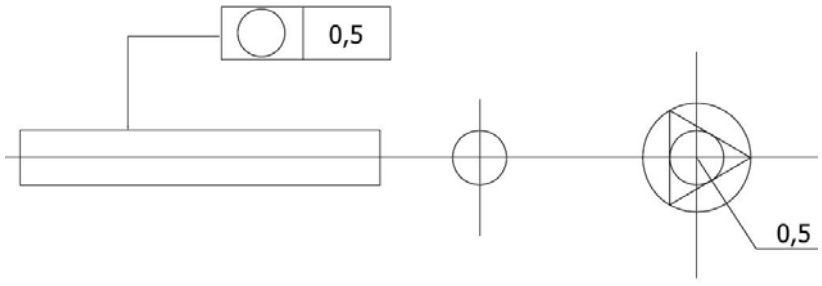


Figura 30: Representação da circularidade (TAYLOR, 2000).

Tolerância de cilindricidade: é a condição pela qual a zona de tolerância especificada é a distância radial entre dois cilindros coaxiais.

Kress, (1974) encontrou resultados insatisfatórios no desvio de cilindricidade em furos desalinhados, e recomenda um erro de alinhamento entre o pré-furo e o alargador menor que 0,020 mm.

A cilindricidade também é uma tolerância de forma macrogeométrica, que tem relação com os cilindros coaxiais. A diferença entre estes cilindros coaxiais é a cilindricidade. O campo da tolerância de cilindricidade é limitado por dois cilindros coaxiais, distantes em “t” (ABNT, 1976).

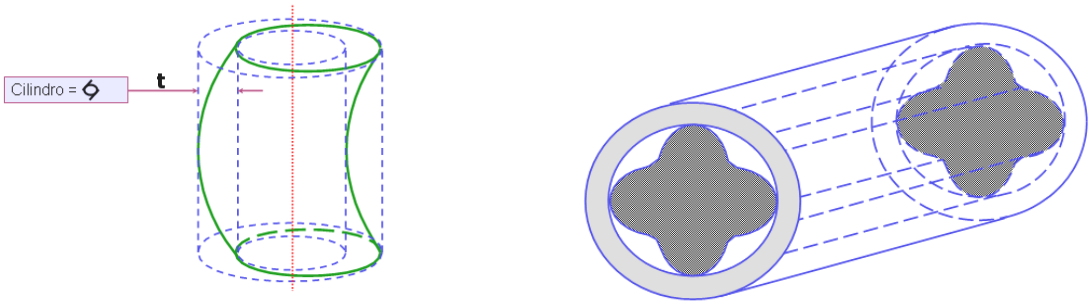


Figura 31: Representação de cilindricidade (TAYLOR, 2000).

A tolerância dimensional é a faixa de valores que a medida obtida pode variar da nominal. Os fatores que levam a esta variação são, por exemplo, a máquina, o processo, os parâmetros adotados nas medidas,dimensões da peça e o sistema de fixação da ferramenta (AGOSTINHO, 1995).

Um sistema balanceado de ferramenta, porta-ferramenta e fuso pode resultar em ampliação de vida útil, redução de máquina parada para a manutenção do fuso e, também, até uma precisão mais apurada e melhor acabamento superficial do diâmetro. Ele envolve a medição do desbalanceamento de uma montagem de ferramenta / porta-ferramenta em uma máquina. A ferramenta e o porta-ferramenta são balanceados como uma única unidade, portanto as informações obtidas devem ser armazenadas para controle e rastreabilidade do processo.

Atualmente, novos desenvolvimentos e tecnologias dos sistemas de fixação estão sendo implementadas para melhoria de qualidade e custo-benefício.

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Análise química e metalográfica do material

A matéria-prima utilizada neste trabalho é uma liga Al-Si obtida em fundição sob pressão na forma de cabeçote para posterior usinagem. No processo de fundição, foi fundido um corpo-de-prova representativo da corrida que foi, posteriormente, fresado e cortado para retirada de amostra de 30 x 30 mm^2 para análise química após limpeza com ar comprimido.

As amostras para análise metalográfica foram, também, obtidas do corpo-de-prova fundido e retiradas na metade da distância entre a superfície e o centro com o intuito de evitar segregação. Essas amostras foram fresadas e, posteriormente, polidas em lixas com granulometria de 180, 240, 320, 400, 500, 600 e 1000 mesh.

Em seguida, foi feito polimento de acabamento em feltro impregnado com pasta diamante com dimensões 7, 3 e 1µm. Essas amostras foram analisadas em microscópio ótico, marca Leitz, com aumento de 200X. Para análise da microestrutura, as amostras foram atacadas com água destilada 95% em volume, ácido fluorídrico HF-1ml, ácido nítrico-HNO_3-2,5ml, ácido clorídrico-HCl-1,5ml, durante 5 horas. Foi feito ensaio de microdureza Vickers em microdurômetro, marca Leitz, carga de 100gf**.**

3.2 Usinagem do cabeçote máquina-ferramenta

Foram utilizados vários cabeçotes nos experimentos na condição de pré-usinados pré-furo de 10,50mm. O primeiro contato da ferramenta com o pré-furo deve ser igual entre todas as arestas de corte, porém devido ao desalinhamento do eixo da ferramenta de pré-furação, erro de batimento da broca, irregularidades na aresta de corte, desvios de forma no pré-furo, problemas na fixação da broca no

fuso da máquina-ferramenta, pode-se levar ao corte não simultâneo e irregular (WEINERT et al, 1998).

Após o processo de pré-usinagem, os cabeçotes foram enviados a Powertrain para usinagem final. A produção do cabeçote do motor Fire é realizado em operações de furação, alargamento, rosqueamento, mandrilamento, fresamento e lavagem. O processo de usinagem é feito em centros de usinagem Huller e Transfer Comau. As peças após posicionamento em paletes são carregadas manualmente pelo operador na operação inicial, sendo, em etapas posteriores, transportadas por portais robóticos até o término do processo. A máquina ferramenta é um centro de usinagem com comando numérico Simens 840D, conforme mostrado na (Figura 32).

Figura 32: Centro de usinagem Huller utilizado na usinagem dos cabeçotes.

A máquina tem potência instalada de 28 kW, eixo árvore com rotação máxima de 16.000 rpm. Utilizou-se o sistema de fixação com mandril hidráulico e térmico, conforme (Figura 33).

Figura 33: Sistemas hidráulico (a) e térmico (b) com broca de metal duro utilizados nos pré-testes.

As brocas utilizadas são de metal duro (WC + Co) com haste paralela, tolerância H7 e sem cobertura, com dois diâmetros ângulo da ponta 145º, ângulo de folga 10º, segundo diâmetro com ângulo da ponta 90º e ângulo de folga 8º, diâmetro da broca de $12{,}150^{+0{,}025mm}_{+0{,}007mm}$. Para alojamento da broca ao sistema de fixação, térmico e hidráulico, foi utilizado o equipamento semi-automático, marca Speroni, dotado de câmera cujo aumento pode chegar a 20X (Figura 34).

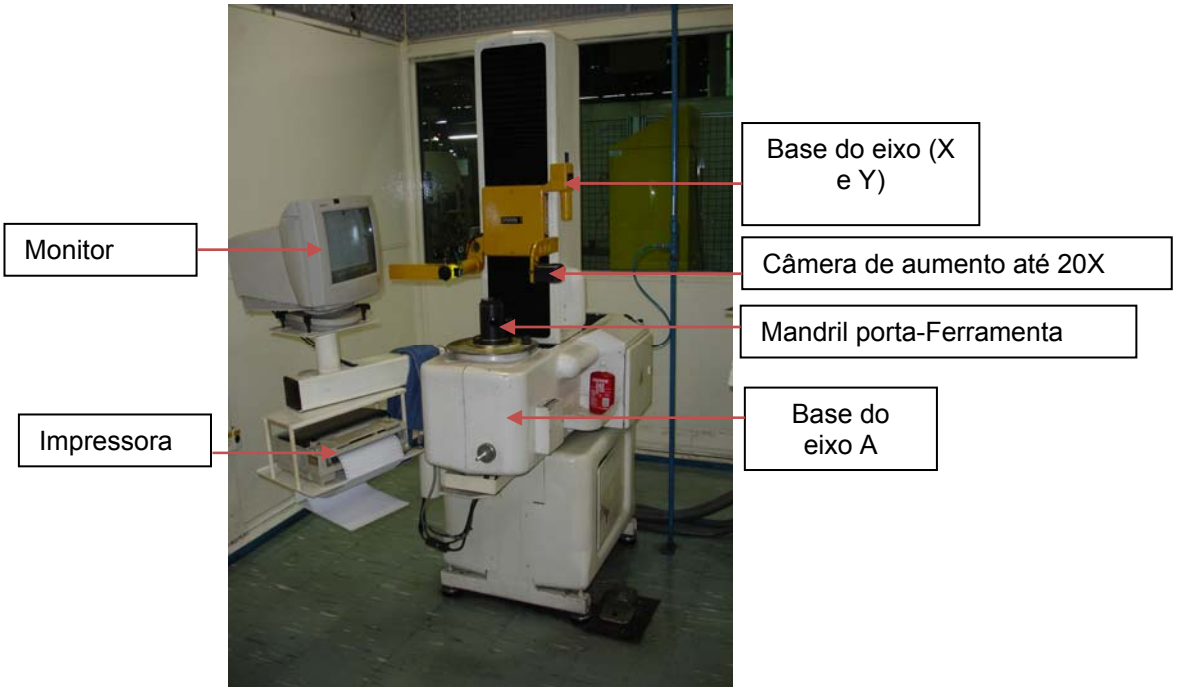


Figura 34: Equipamento de medição Speroni, utilizado para preset de ferramentas.

Antes da fixação da broca, mediu-se a altura da face do HSK à ponta da ferramenta e o diâmetro da broca, cujos valores devem coincidir aos valores alimentados no banco de dados da máquina. Para fixação da broca ao sistema térmico, utilizou-se um maçarico para aquecer a região de fixação da broca. A temperatura na região aquecida não foi controlada em razão da heterogeneidade do aquecimento, mas estimou-se em torno de 600°C.

Após montagem da broca, esta foi inspecionada visualmente. Mediu-se, em seguida, o erro de batimento radial na haste da broca nos sistemas de fixação hidráulico e térmico na distância correspondente à 127mm da face do cone HSK em relação à ponta da broca através de relógio comparador, marca Mitutoyo, resolução de 1µm, acoplado a uma base magnética (Figura 35).

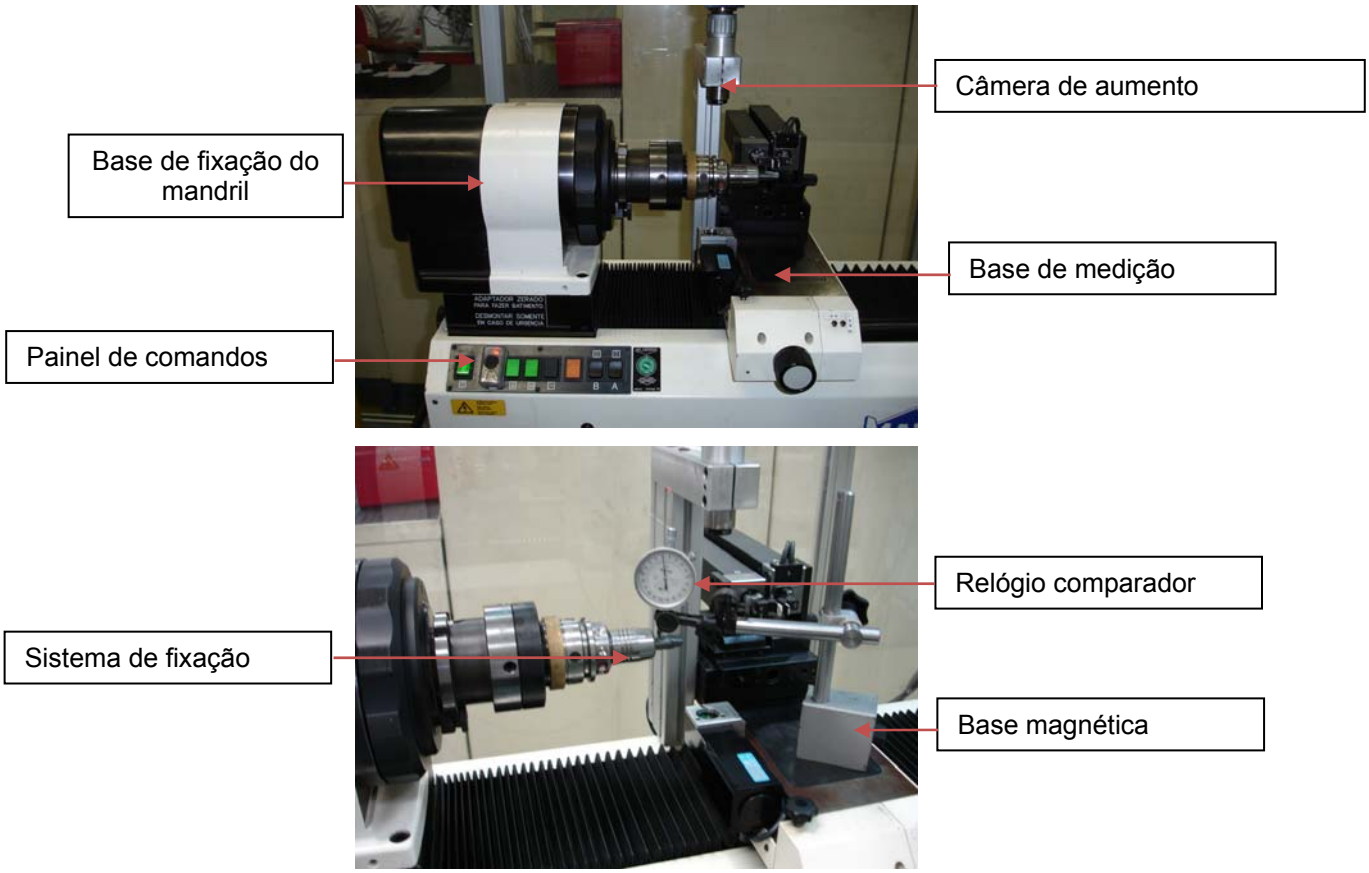


Figura 35: Equipamento de medição do batimento posteriormente à montagem dos sistemas hidráulico e térmico.

A montagem dos sistemas de fixação foi feita manualmente na máquina-ferramenta, marca Huller, CNC 840D, enquanto que a alimentação das peças na máquina foi feita por robôs. Os valores de montagem da ferramenta obtidos no

Speroni foram inseridos no programa da máquina Huller. Utilizou-se velocidade de corte de 289m/min, rotação de 8.000rpm, avanço de 0,36mm/rot e profundidade de corte de 0,05mm. Ensaios realizados com ligas de alumínio e alargadores monocortantes, não apresentaram variações de rugosidade, erro de forma e dimensional do furo com a variação da velocidade de corte (SCHROETER, 1989; ECKHARDT, 1993).

O fluido de corte utilizado foi o HOCUT® B 205D com a concentração de 6% a 8% e pressão de 30 bar. Os furos tinham uma profundidade de 8mm. Após completar os teste de furação, as peças foram resfriadas até a temperatura ambiente, e medidas no laboratório de metrologia.

Foram retiradas as peças de número 1, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 para medição dos parâmetros geométricos cilindricidade, circularidade e diâmetro do furo, respectivamente, nos equipamentos Talyrond 4 Coord Her A e Hera 3 coord. Mediu-se, também, o erro de batimento para os sistemas hidráulico e térmico nesta mesma seqüência.

Os parâmetros de superfície R_a, R_z, e R_t foram avaliados para as peças 1,50,100,150,200,250,300,350,400,450,500,1500,3000,4500,6000,7500,8500,10500 e 11.500, utilizando-se equipamento, marca Taylor Hobson Form-Talysurf series e filtro aspereza gaussiano, cut-off 0,8mm, e comprimento de 4,8mm. A tolerância de R_a 1,6μm da superfície do furo foi controlada através de software desenvolvido especificamente para esta análise. A análise de desgaste da ferramenta utilizada nos experimentos foi feita através de um microscópio ótico OMIS MIMI (Figura 36).

Figura 36: Microscópio ótico OMIS MIMI de 20 à 125X de aumento.

Utilizou-se, também, para esta análise microscópio eletrônico de varredura, marca Philips, modelo XL30, dotado de sistema de energia dispersiva de raios-X (EDS).

A produção atual da ferramenta é de 8.000 peças por aplicação, ou seja, 240m de percurso de avanço usinado. A vida da ferramenta foi monitorada tomando como referência a qualidade dos furos, segundo parâmetros estabelecidos a projeto do cabeçote. A fim de determinar a vida da broca, foi necessário, também, definir um critério de vida. O método comumente usado é medir uma quantidade predeterminada de desgaste de flanco o que foi feito com o material depositado sobre a superfície da broca e após a retirada deste mesmo material.

As brocas, após um número definido de furos pré-especificado, foram colocadas em solução aquosa com 10% de NaOH durante 24horas. Posteriormente, estas brocas foram analisadas em microscópio ótico e de varredura para medição do desgaste e análise do material depositado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise química e metalográfica do material

Os ensaios foram realizados no cabeçote do motor, fundido sob pressão em liga de Al-Si com composição química em porcentagem em peso, mostrada na Tabela 2.

Tabela 2: Composição química média da liga Al-Si, em porcentagem em peso.

Elemento (%)	Al	Si	Cu	MG	Mn	Ti	Fe	Zn	Ni	Pb	Sn
Cabeçote	86,8	7,76	3,11	0,36	0,40	0,02	0,74	0,56	0,03	0,05	0,02

A utilização do cobre melhora a usinabilidade das peças injetadas facilitando a solidificação a temperaturas mais baixas, e reduzindo descontinuidades internas na peça fundida. A presença do ferro nas ligas Al-Si é considerado como fator de fragilização, reduzindo o tempo de desmoldagem. A microestrutura consistiu de fase alfa rica em alumínio e o eutético. A fase intermetálica do eutético é $Al_5Cu_2Mg_2Si_6$ ou $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ (Teer, D.G, 2005). O teor de silício da liga significa que ela contém partículas primárias que promovem desgaste na ferramenta por mecanismo de abrasão, quando comparado às outras ligas de alumínio (Figura 37).

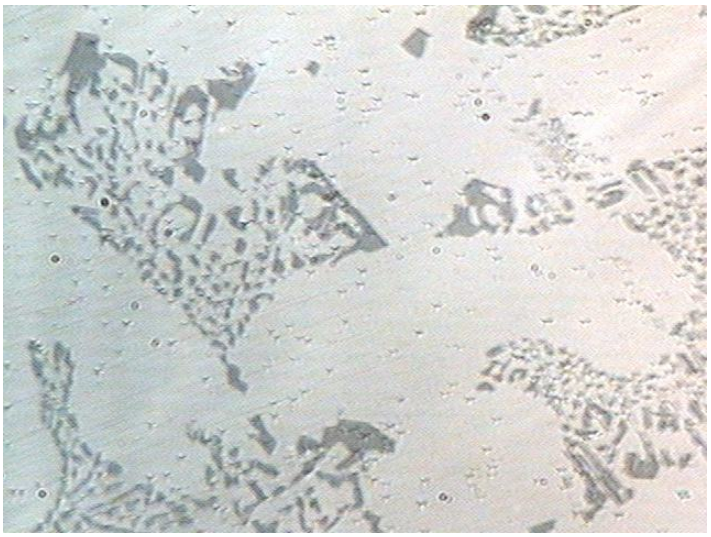


Figura 37: Microestrutura da liga Al-Si, evidenciando a fase clara rica em alumínio e o eutético.

4.2 Parâmetros geométricos

A figura 38 mostra o cabeçote com os respectivos furos que foram avaliados ao longo do processo de vida da ferramenta. Na máquina CNC 840D, alimenta-se dois cabeçotes em uma operação. Nesta operação, realiza-se o acabamento dos dois furos através de broca montada no mandril térmico e hidráulico (Figura 38).

Figura 38: Cabeçote Fire com respectivos furos que foram analisados nos experimentos. Os furos de um cabeçote foram produzidos através de um mesmo sistema de fixação.

A figura 39 mostra a evolução do erro de batimento das ferramentas fixadas no sistemas térmico e hidráulico após a furação das peças número 1, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 e 500.

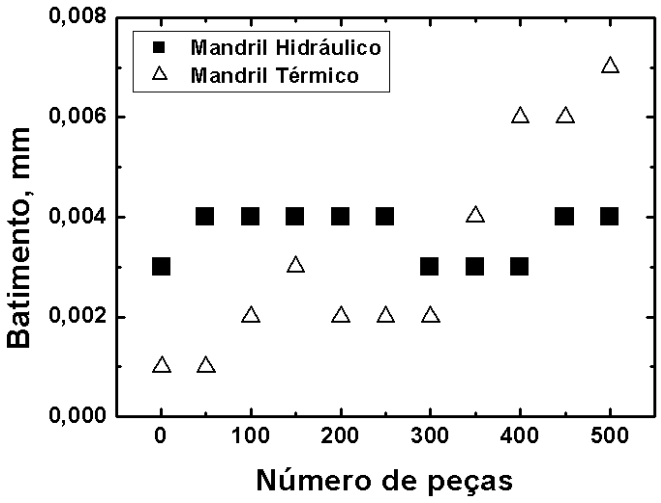


Figura 39: Batimento das ferramentas em relação ao número de peças usinadas.

Verifica-se que o batimento máximo do sistema térmico foi menor que o batimento do sistema hidráulico até a peça de número 300, e, posteriormente, atingiu valor de 0,007mm na peça de número 500. Essa elevação do erro de batimento pode ser devido ao deslocamento da ferramenta na sede do mandril, em razão da vibração do conjunto.

A figura 40 mostra a evolução do diâmetro dos furos obtidos nas peças de número 1 a 500. Observa-se que o valor médio dos furos apresentou-se dentro da especificação de projeto $12,20^{+0,0}_{-0,1} mm$. O valor médio do erro de batimento do sistema térmico menor que o sistema hidráulico até a peça número 300 e, por sua vez, maior a partir da peça 350 não afetou a dimensão do furo. Verificou-se, então, que o erro de batimento não interferiu nas dimensões do furo. Nas peças de número 350 e 400, visou-se o valor médio do diâmetro de 12, 160mm devido à interrupção do processo por falha na máquina.

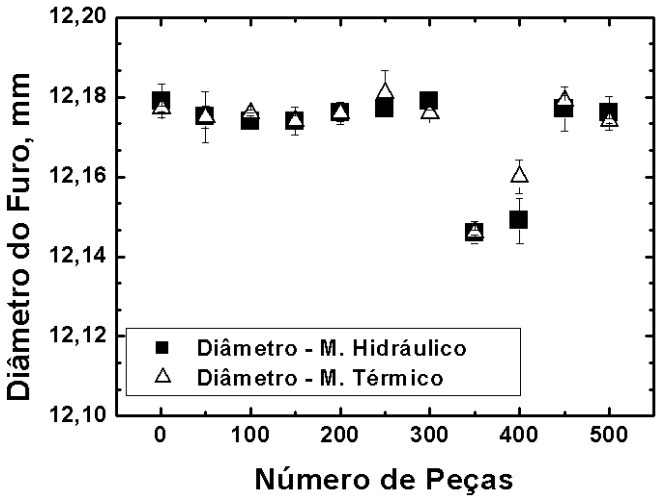


Figura 40: Diâmetro do furo de fixação da bucha de referência em função do número de peças.

As figuras 41 e 42 mostram a evolução da cilindricidade e circularidade em função do número de peças usinadas. Os valores médios e dispersão da cilindricidade e circularidade obtidos pelo sistema hidráulico foram maiores que os valores obtidos pelo sistema térmico, o que pode ser evidência da maior rigidez da montagem por interferência do sistema térmico.

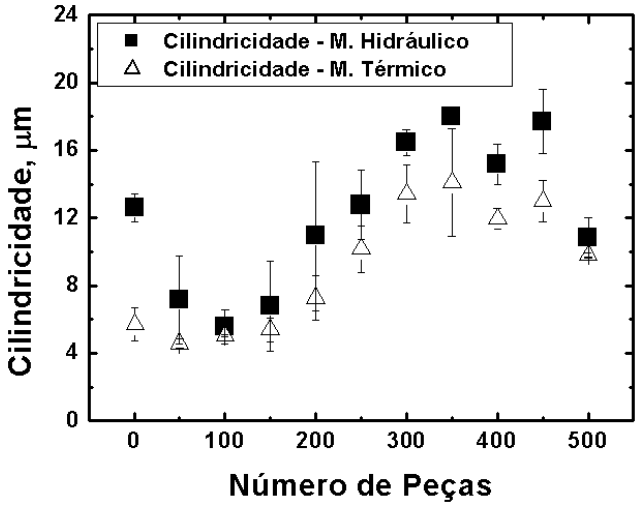


Figura 41: Análise da cilindricidade dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico.

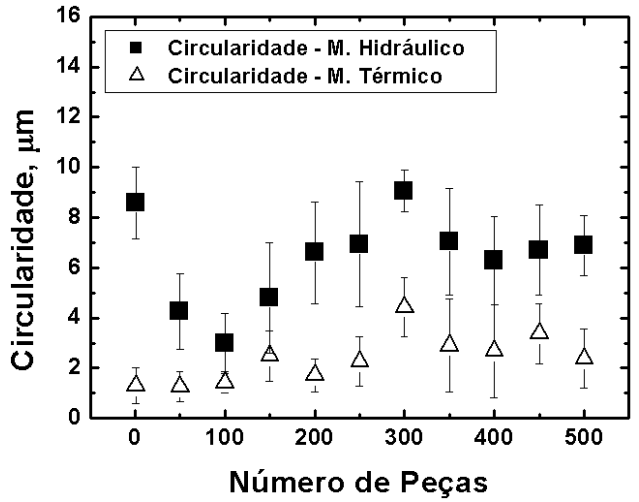
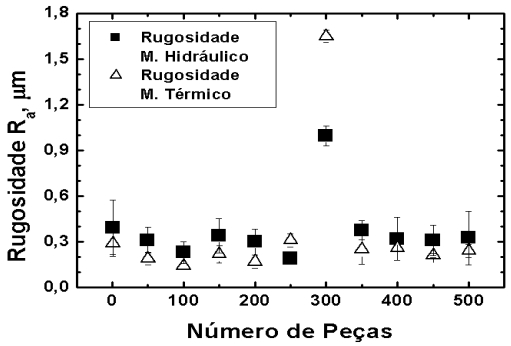


Figura 42: Análise da circularidade dos furos gerado pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico.

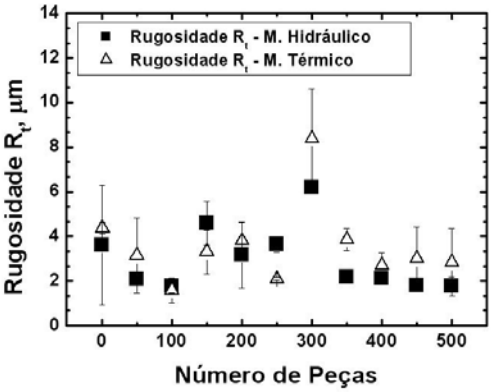
Na figura 43 (a), (b) e (c) mostra-se a evolução da textura da superfície em função do número de peças usinadas. Os valores médio e dispersão da superfície analisada R_a R_t, e R_z para os dois sistemas térmico e hidráulico não apresentaram variações acentuadas até a peça número 250 com valor médio, respectivamente, de 0,3 , 4 e 2µm. A elevação do valor de rugosidade na peça de número 300 não se confirmou posteriormente, sendo, possivelmente, devido ao efeito de parada no equipamento para manutenção.

O aumento do erro de batimento a partir da peça número 300 não contribuiu para elevação dos valores médios e dispersão da rugosidade dos furos obtidos pelo sistema térmico e hidráulico. A evolução da rugosidade R_t e R_z com o número de peças usinadas a partir da peça 300 mostra, por sua vez, que a broca fixada no

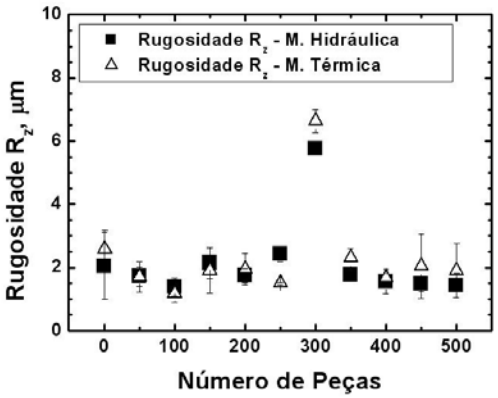
mandril térmico provocou furo com textura média acima do valor médio obtido pelo mandril hidráulico. Nota-se que estas variáveis R_t e R_z comportaram-se de modo diferente do parâmetro de rugosidade R_a. Este fato não pôde ser justificado precisamente, mas parece que o erro de batimento não contribuiu para esta anomalia de resultado. Estudos mais aprofundados merecem ser feitos no sentido de justificar tais resultados.



(a)



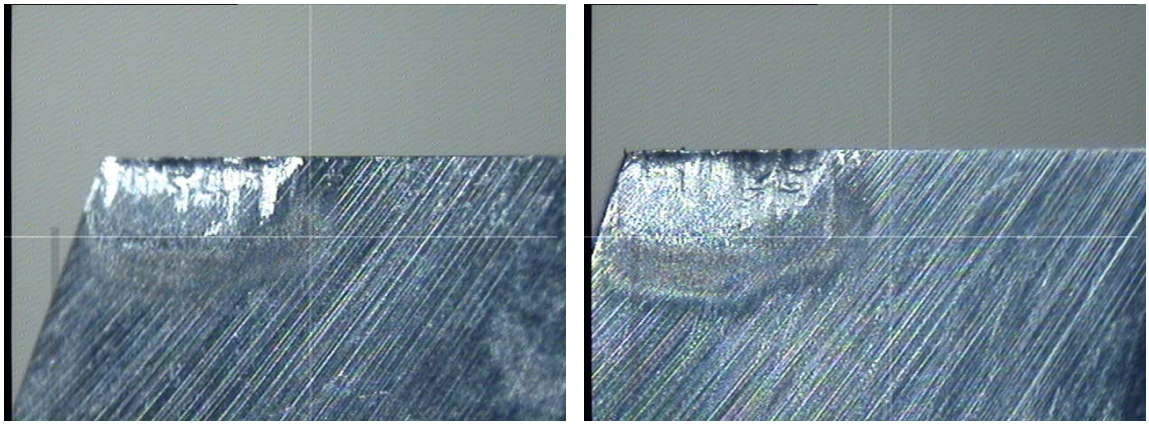
(b)



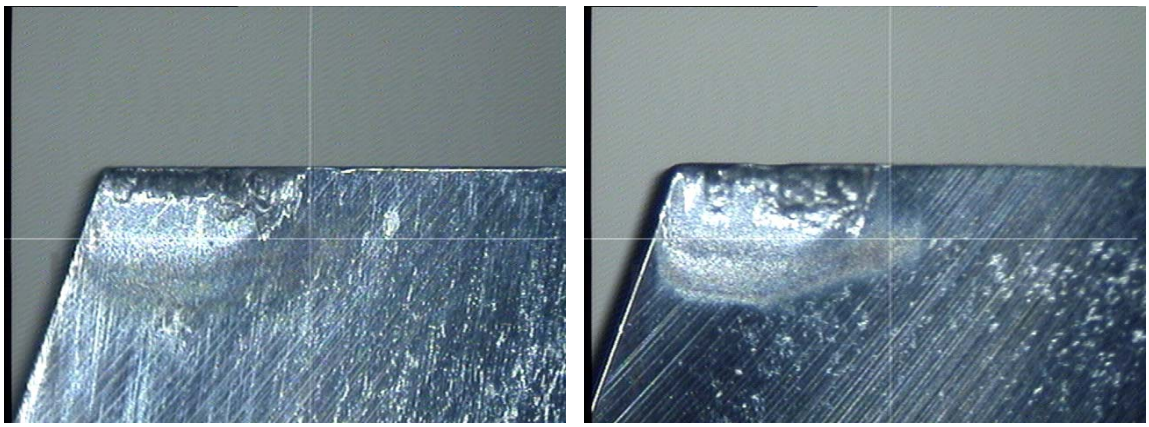
(c)

Figura 43: Análise da superfície R_a, R_t e R_z dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico.

A Figura 44 mostra o aspecto do desgaste verificado no flanco da broca em microscópico ótico para os sistemas térmico e hidráulico nas faces 1 e 2.



(a)



(b)

Figura 44: Análise do desgaste VB_{max} das faces 1 e 2 da broca fixada nos mandris hidráulico (a) e (b) térmico.

Observa-se que a medida do desgaste foi feita entre a aresta de corte e a largura máxima do contraste de cor verificado no microscópio. O desgaste observado é a média dos valores de espessura medidos nas duas faces.

A figura 45 mostra a evolução do desgaste do flanco em função do número de peças usinadas até a peça de número 3000. Não se observou o crescimento consistente da taxa de desgaste com o número de peças tanto para o sistema térmico quanto para o hidráulico, isto é, a taxa de desgaste permaneceu praticamente constante entre as peças de número de 500 até 3000.

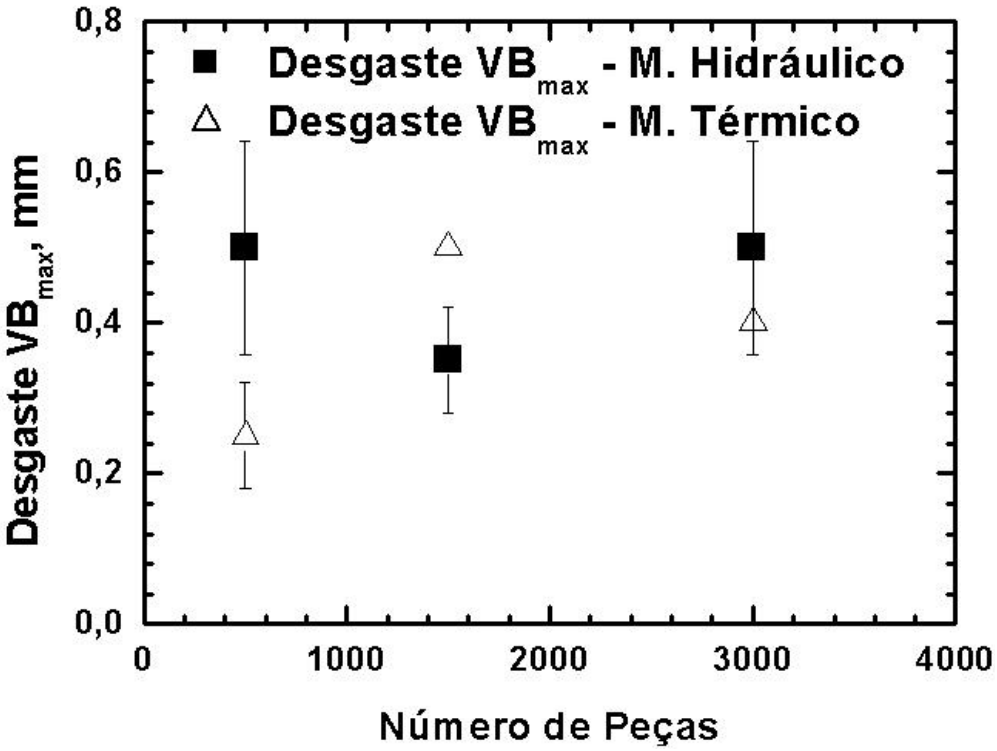


Figura 45: Análise do desgaste VB_{max} na aresta de corte da broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico.

A Figura 46 mostra o aspecto da superfície das faces 1 e 2 broca ao microscópio eletrônico de varredura diferentes ângulos de observação e aumentos de 160 e 250X para o sistema hidráulico.

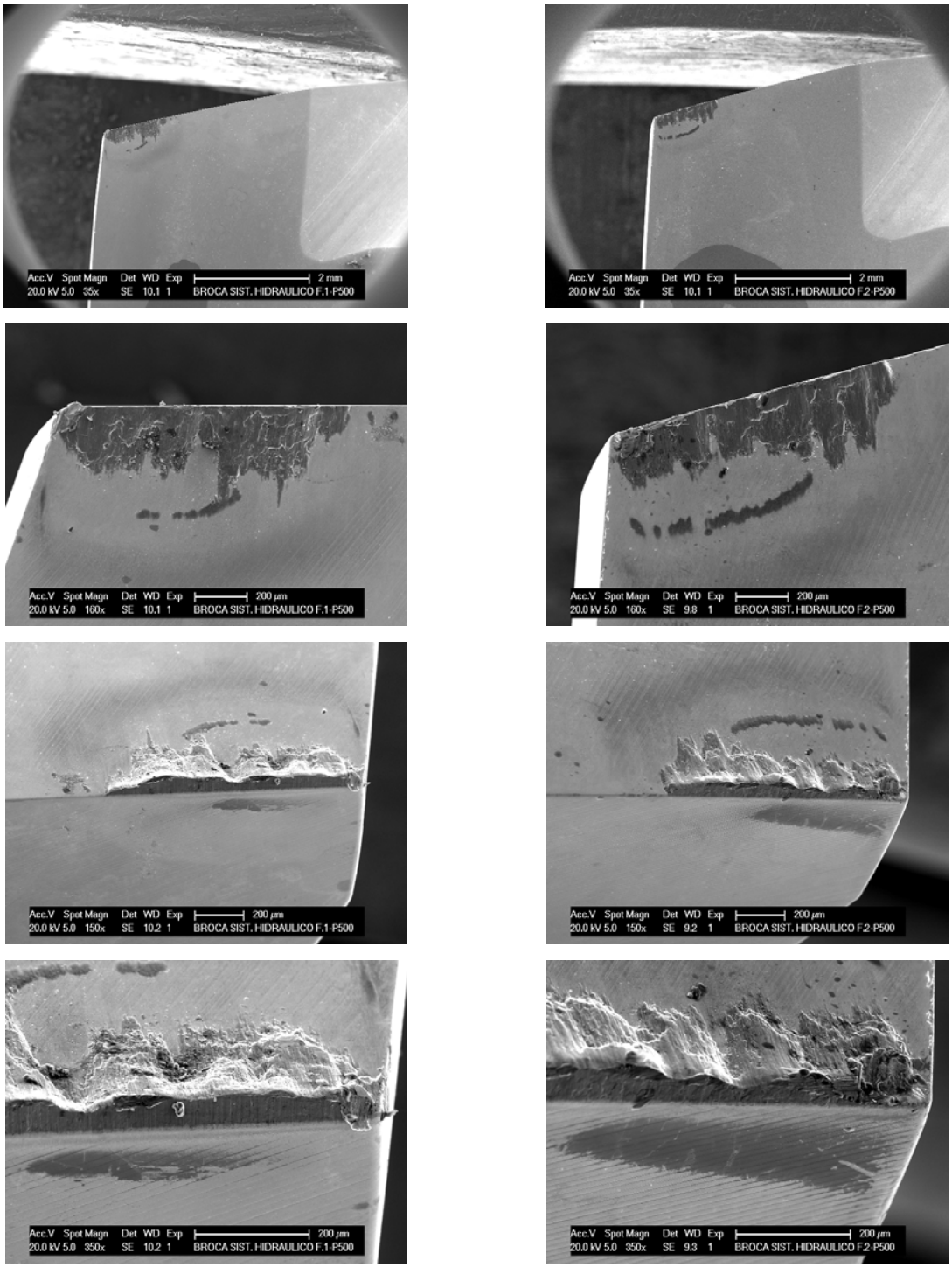


Figura 46: Presença de material nas faces 1 e 2 da broca sistema hidráulico após furação da peça de número 500.

Evidencia-se a presença de picos e vales ao longo da espessura da região de desgaste e a diferença do valor desta espessura ao longo da profundidade. A análise química feita no microscópico eletrônico de varredura (MEV) do material presente nas faces 1 e 2 da broca de fixação do sistema hidráulico após 500 peças produzidas mostrou a presença de Al e Si (Figura 47).

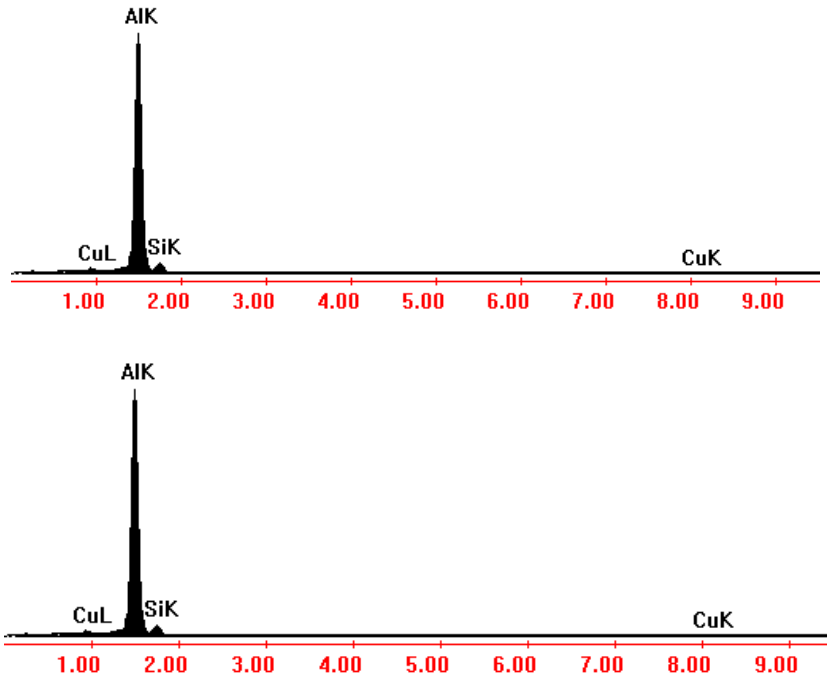


Figura 47: Análise química obtida por EDS em microscópio eletrônico de varredura do material aderido sobre a broca no mandril hidráulico.

A análise química da broca feita em região distante da aresta de corte em EDS mostrou a presença de W, Si e Co (Figura 48).

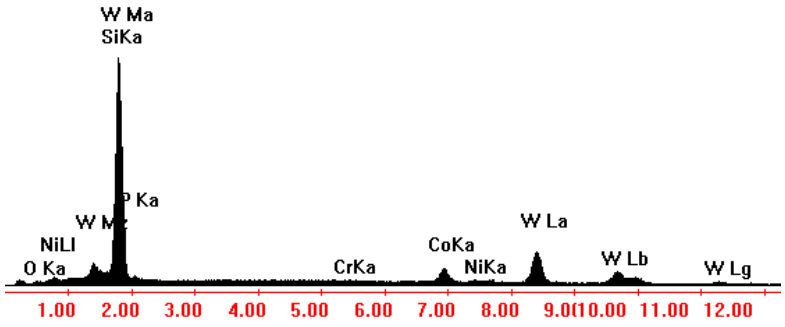


Figura 48: Análise química da broca do sistema de fixação hidráulico.

O aspecto em microscópio de varredura da superfície da broca após ataque com a solução de NaOH é mostrado na (Figura 49).

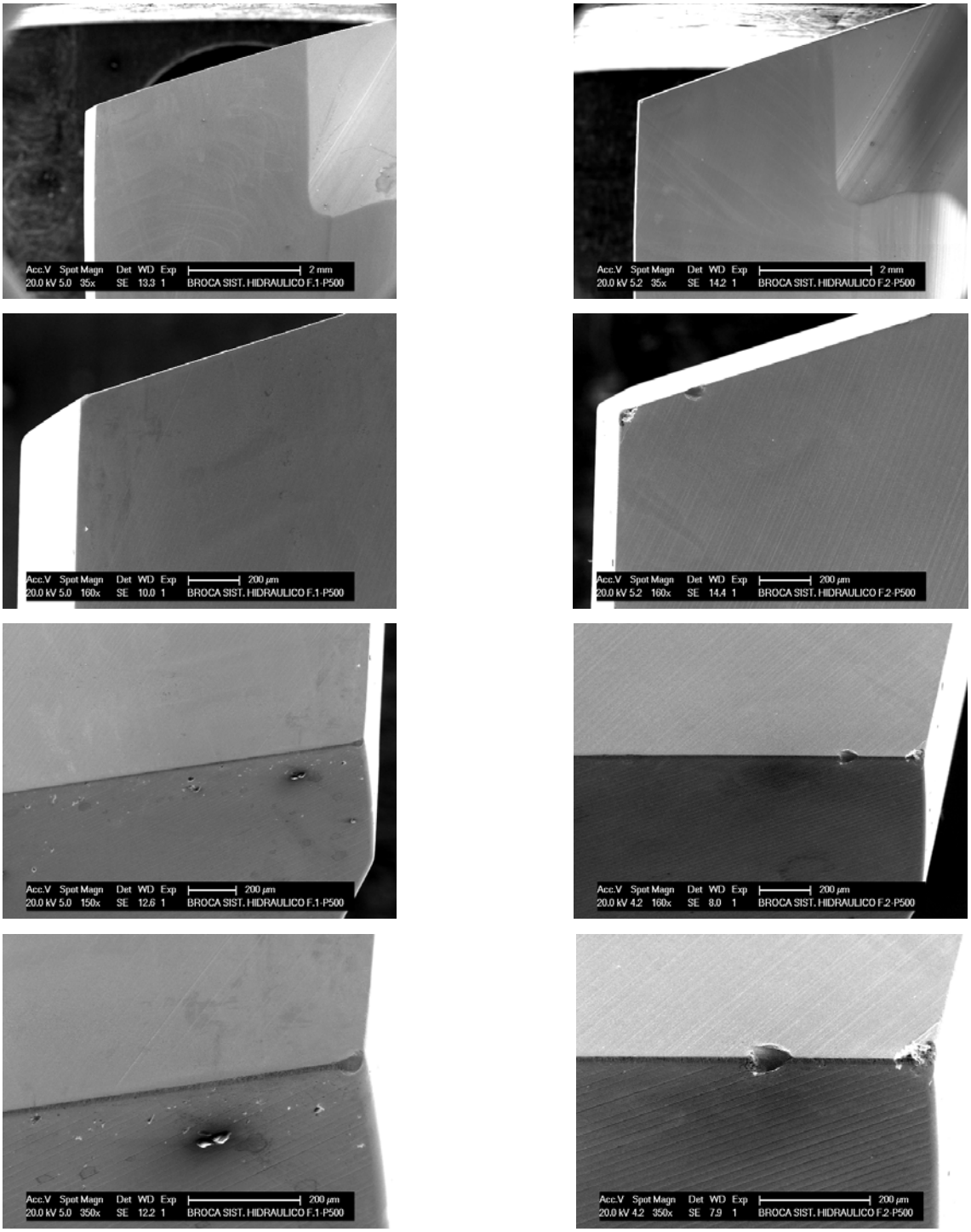
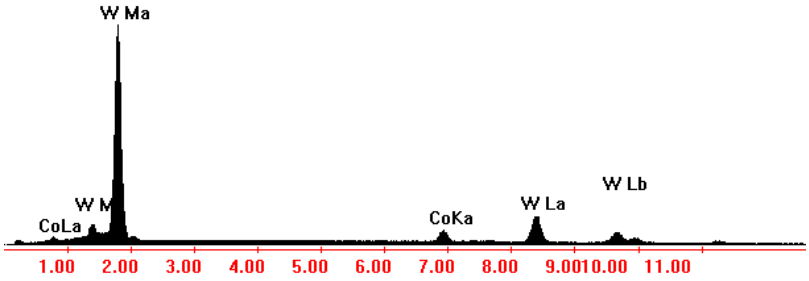


Figura 49: Desgaste da aresta de corte da broca do sistema hidráulico após decapagem em solução de NaOH nas faces 1 e 2 na peça furada de número 500.

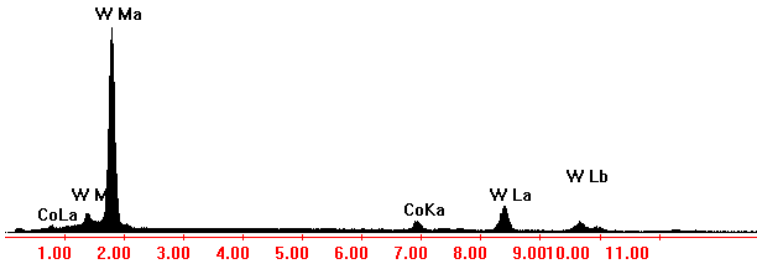
Observa-se após a decapagem química que houve lascamento na aresta de corte e não se tem a presença de material aderido sobre a superfície da broca quer

na face 1 ou na face 2. Este lascamento na aresta de corte não promoveu alteração nos parâmetros geométricos e de superfície, quando comparado com o sistema térmico.

A figura 50 mostra a análise química por EDS das faces 1 e 2 da broca fixada no sistema hidráulico após a decapagem, utilizando-se a solução de 10% de NaOH em água destilada durante 24horas.



(a)



b)

Figura 50: Análise química após decapagem em solução de NaOH nas faces 1 e 2 na peça usinada de número 500 com sistema de fixação hidráulico.

Confirmou-se que a análise química é representativa do material da broca, isto é, Co-WC.

A figura 51 mostra o aspecto da superfície da broca em microscópio eletrônico de varredura em diferentes ângulos de observação e aumentos de 160 e 250X das faces 1 e 2 para o sistema térmico.

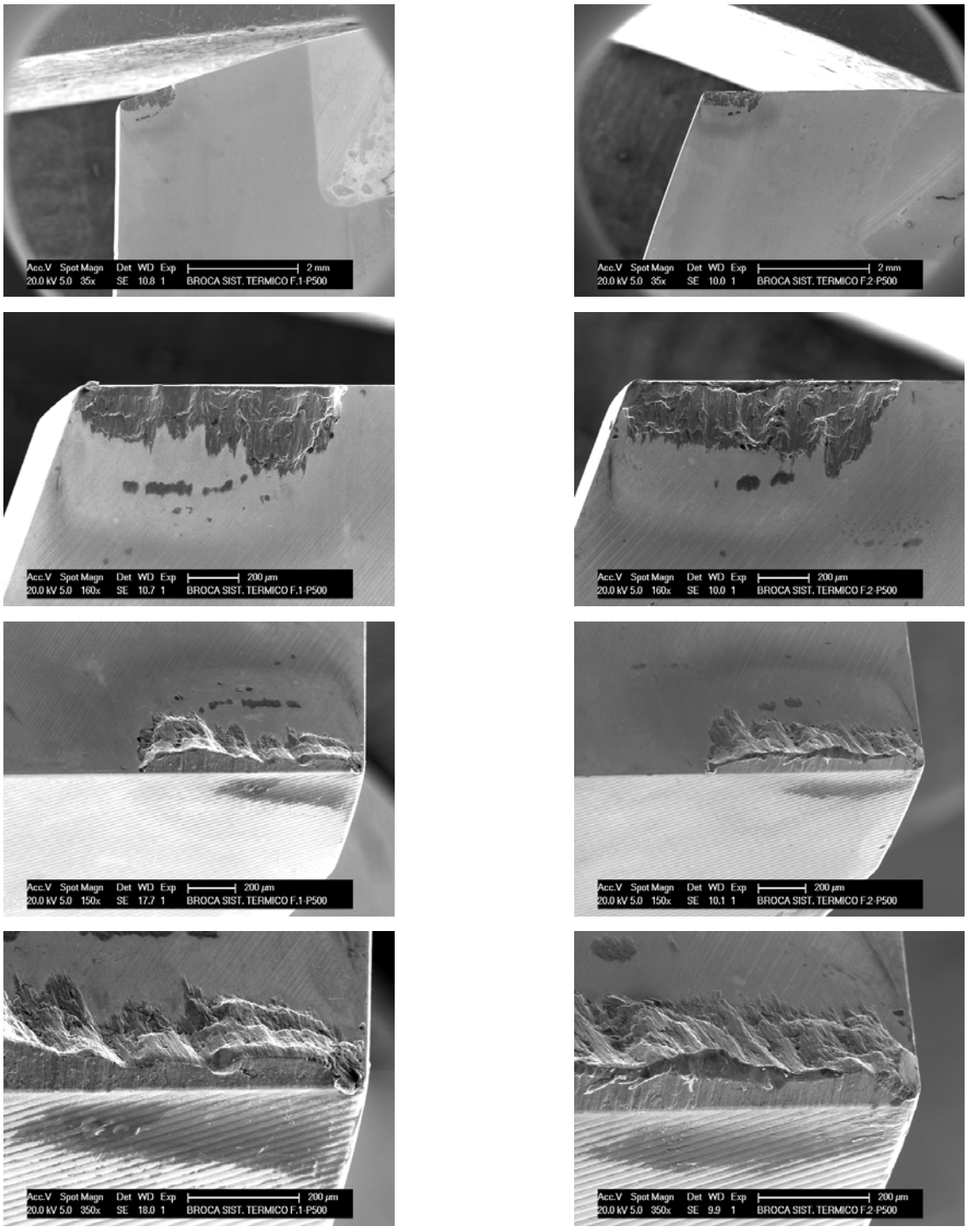
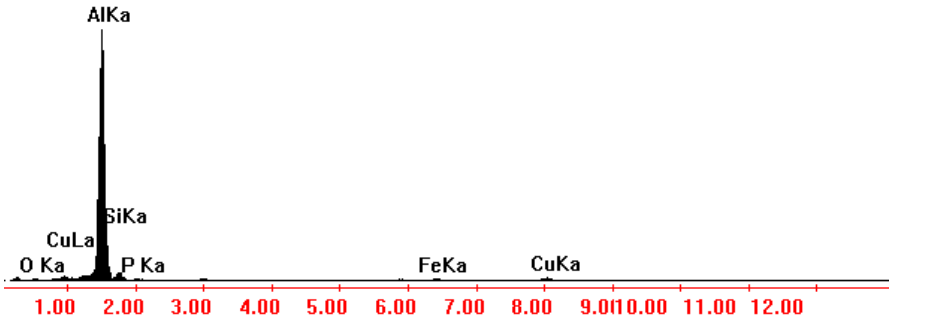
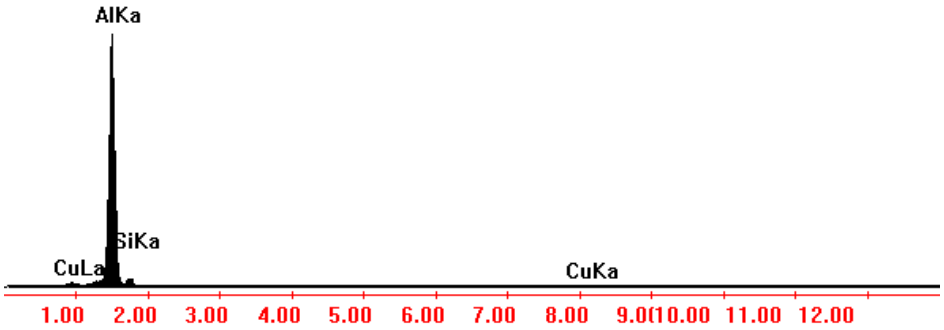


Figura 51: Presença de material da peça 500 nas faces 1 e 2 da broca do sistema térmico.

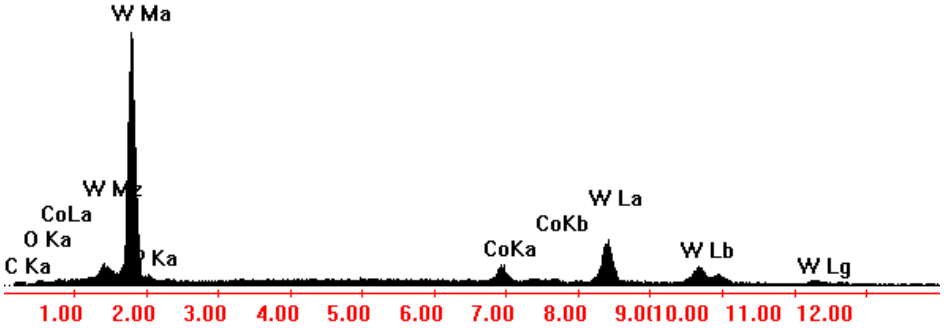
A análise química do material aderido e da broca feita em EDS mostrou, respectivamente, a presença de Al, Si e W/Co (Figura 52).



(a)



(b)



(c)

Figura 52: Análise química obtida por EDS em microscópio eletrônico de varredura do material aderido sobre a broca no mandril térmico (a, b e c).

Confirmou-se o mesmo resultado encontrado para o sistema hidráulico, isto é, aderência do material do cabeçote sobre a face da broca.

Mostra-se o aspecto em microscópio eletrônico de varredura da superfície da broca do sistema térmico após ataque com a solução de NaOH (Figura 53).O lascamento, agora, ficou restrito à ponta da broca na face 2 e formação de sulcos de desgaste na face.

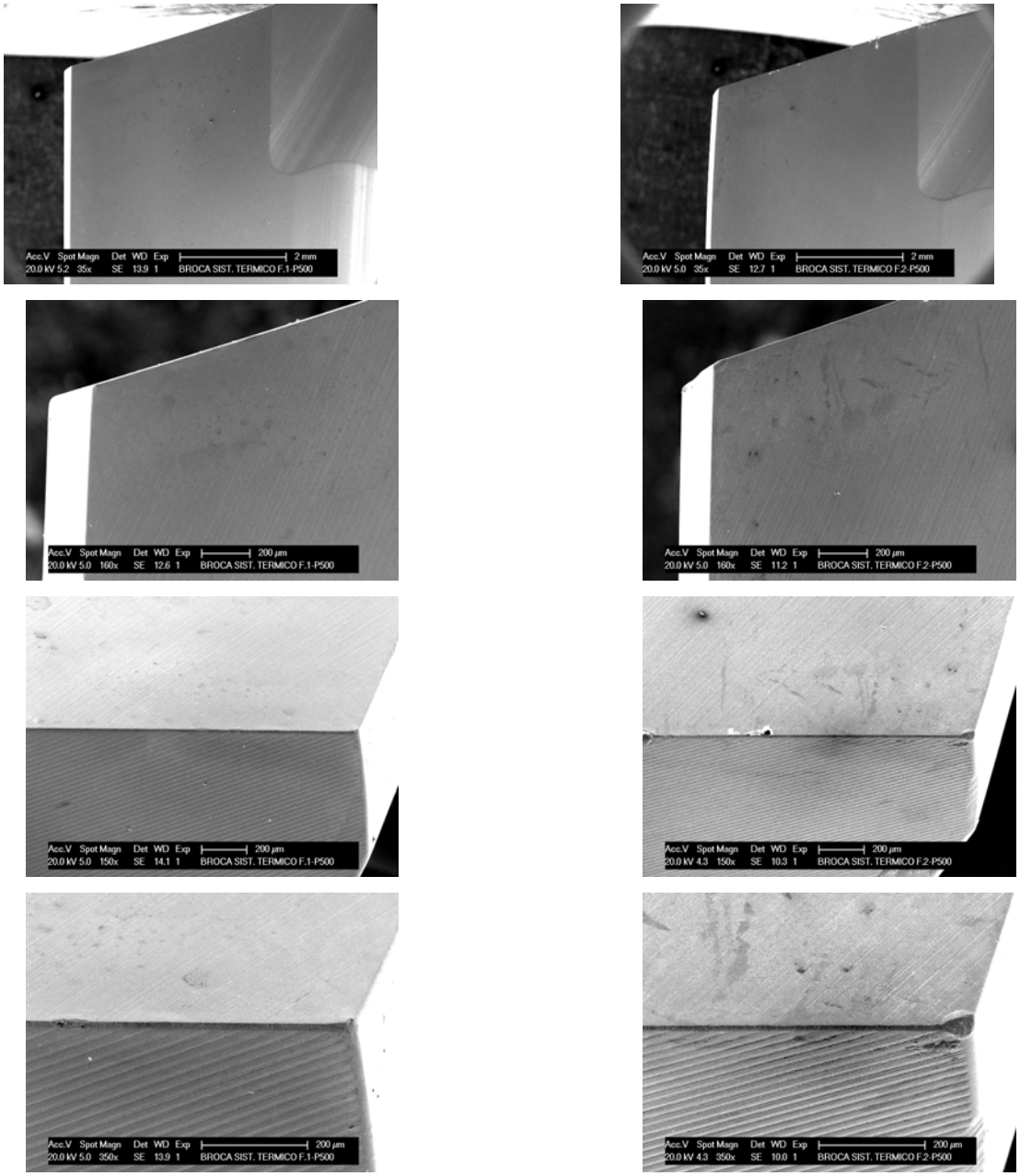
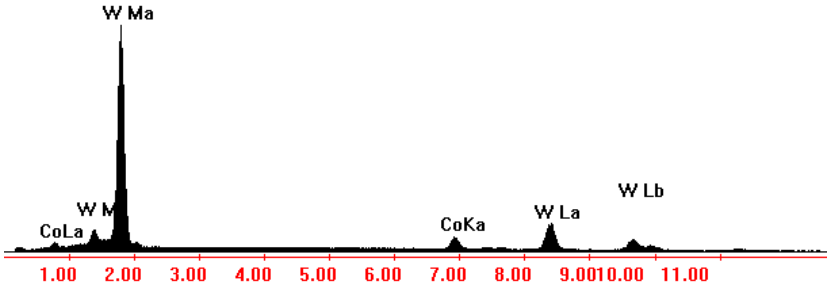
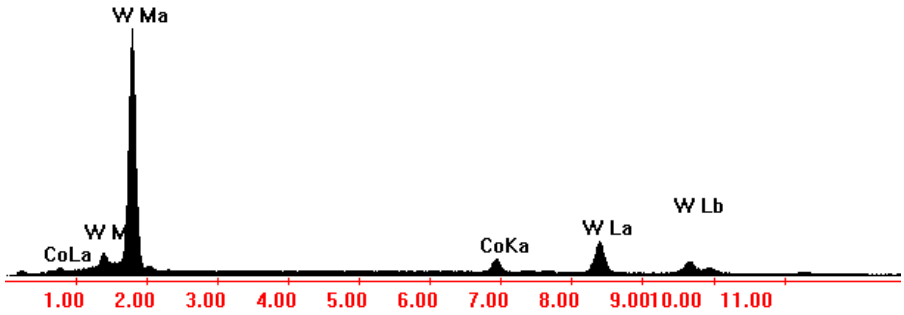


Figura 53: Desgaste da aresta de corte da broca do sistema térmico após decapagem em solução de NaOH nas faces 1 e 2 na peça número usinada de número 500.

A figura 54 mostra as faces 1 e 2 da broca fixada no sistema térmico após a decapagem, utilizando-se a solução de 10% de NaOH durante 24horas.



(a)



(b)

Figura 54: Análise química após decapagem em solução de NaOH nas faces 1 e 2 na peça usinada de número 500 em sistema térmico.

Comprovou-se que, também, houve aderência do material do cabeçote na aresta de corte e a espessura do material depositado estava sendo avaliado como desgaste da broca. Realizou-se experiência com o intuito de verificar a influência deste material depositado nos parâmetros geométricos e de superfície. Foi feita a usinagem das peças de número 1 até 99, 199, 299 e 399. Após esta usinagem, as brocas foram colocadas em solução de NaOH para decapagem do material aderido. Em seguida, os cabeçotes foram avaliados dimensionalmente antes e após decapagem.

A evolução do batimento com o número de peças antes e depois da decapagem para os mandris hidráulicos e térmicos é mostrada na Figura 55. Não se constatou variação entre o comportamento do batimento com o número de peças para os mandris hidráulico e térmico antes e após decapagem, uma vez que a deposição do material ocorre no flanco e não no diâmetro externo da broca.

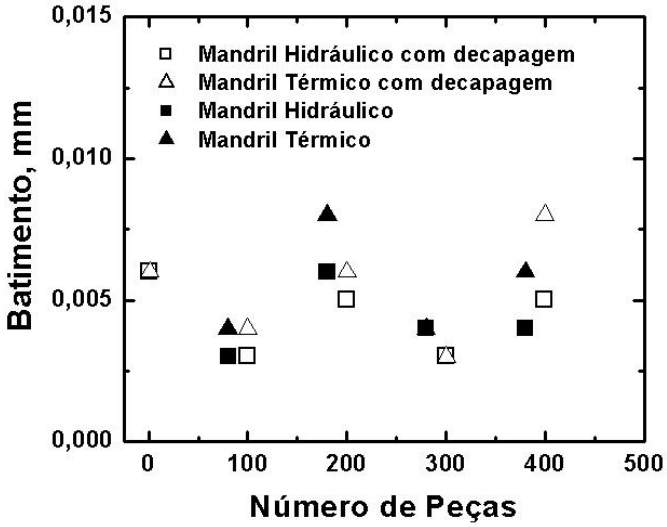


Figura 55: Batimento das ferramentas em relação ao número de peças usinadas.

A figura 56 mostra a evolução da circularidade com filtros de 1:15 e 1:50 de 1 até 400 peças com e sem decapagem da broca. Não houve diferença de comportamento com relação ao tipo de filtro, mas após decapagem percebe-se uma redução na circularidade.

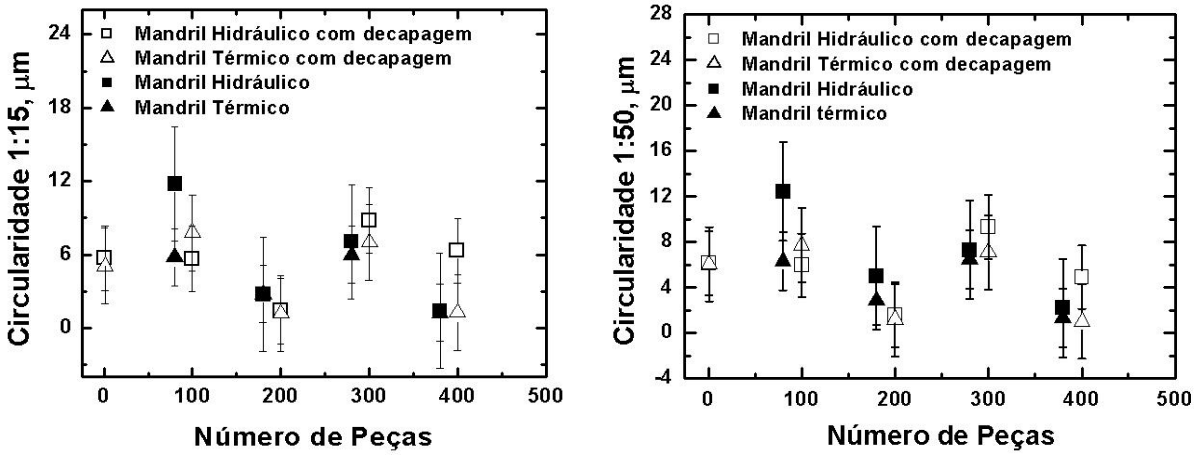


Figura 56: Análise da circularidade dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico.

A figura 57 mostra a evolução da cilindricidade com o número de peças de 1 até 400 sem e com decapagem da broca. Não ocorreu consistentemente redução na cilindricidade com a decapagem tanto para o mandril hidráulico como o térmico.

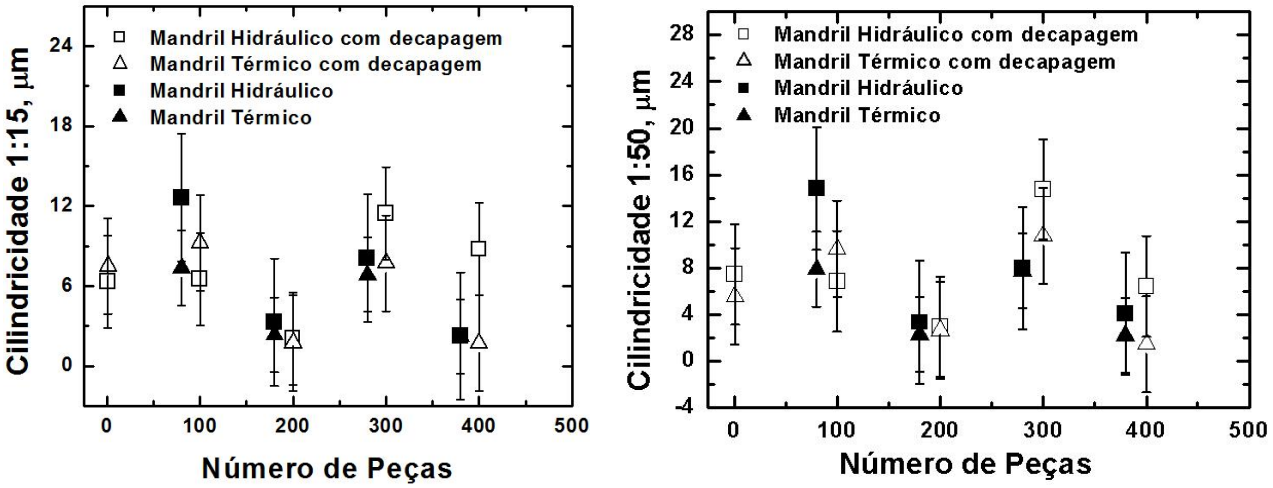
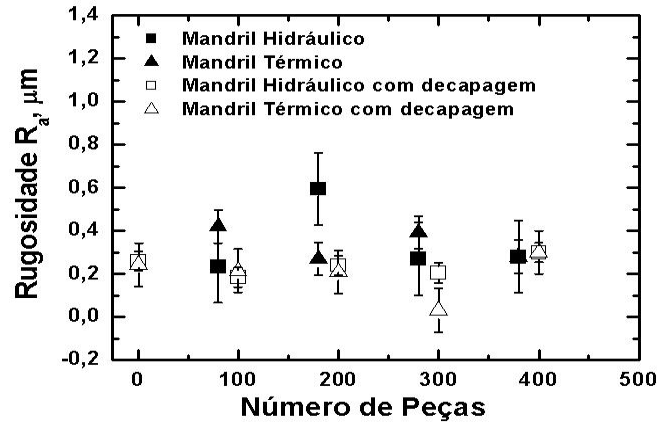


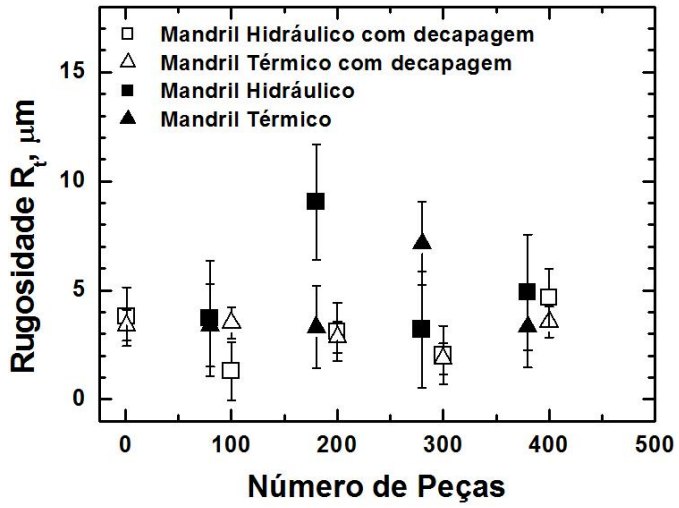
Figura 57: Análise da circularidade dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico.

A figura 58 (a), (b) e (c) mostra o comportamento da textura superficial avaliada através do R_a, R_t e R_z com o número de peças de 1 até 400 com e sem decapagem. Verificou-se, agora, que o material aderido no flanco da broca ampliou os valores de rugosidade medidos através tanto de Ra, quanto R_t e R_z.

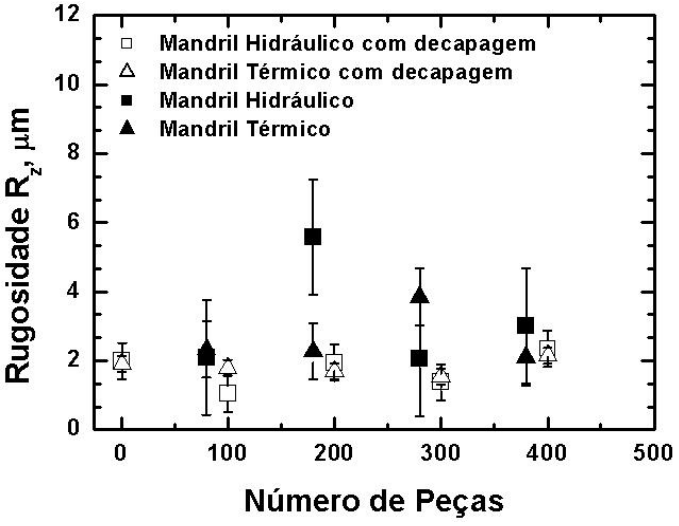
Este resultado divergiu dos valores obtidos nos experimentos de furação da peça de 1 até 500, onde os parâmetros R_t e R_z não tiveram mesmo comportamento do R_a. Este resultado pode ser devido à deposição e retirada do material durante a furação das peças o que define a textura.



(a)



(b)



(c)

Figura 58: Análise da superfície R_a, R_t e R_z dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico.

A evolução do diâmetro dos furos com o número de peças de 1 até 400 com e sem decapagem não mostrou diferença significativa (Figura 59). Pode-se, talvez,

justificar este resultado pela natureza do material aderido no flanco e, também, na adesão deste material à broca. Para este número reduzido de furos, a adesão é física e não química o que torna a retirada do material facilitada ao longo do processo de usinagem.

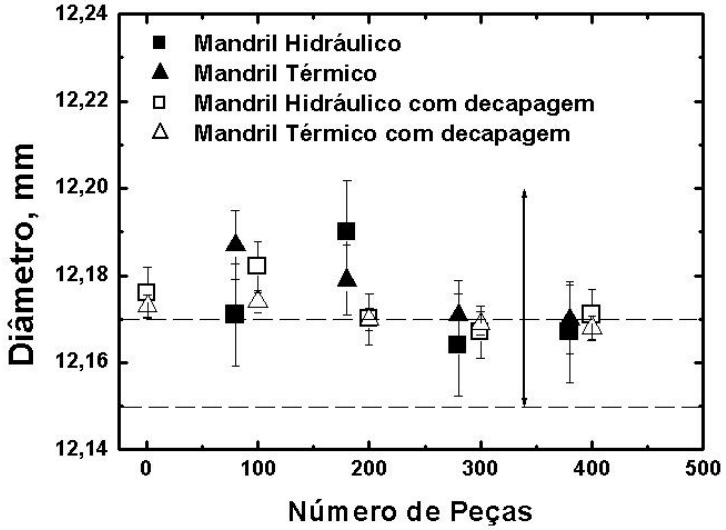


Figura 59: Diâmetro do furo de fixação da bucha de referência em função do número de peças.

A figura 60 já mostra que para a primeira peça tem-se material aderido da ordem de 0,5mm de espessura e este valor oscila ao longo do processo, evidenciando a deposição e retirada de material.

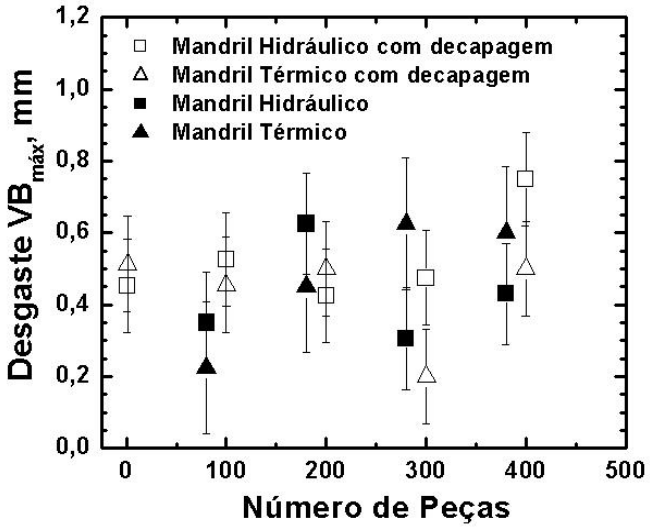


Figura 60: Análise do desgaste VB_{max} na aresta de corte da broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico.

A medição do desgaste em microscópio ótico com o intuito de analisar o processo de desgaste da broca foi feita análise em MEV por espectrometria de energia dispersiva do material depositado da aresta principal de corte da broca. Constatou-se que a região onde foi avaliado o desgaste apresentou composição química similar ao material do cabeçote. Sendo assim, foi feita a retirada do material depositado e verificado o aspecto de forma e fratura da aresta de corte.

A figura 61 mostra a evolução do erro de batimento das ferramentas fixadas no sistemas térmico e hidráulico após a furação das peças número 1 até 11.500.

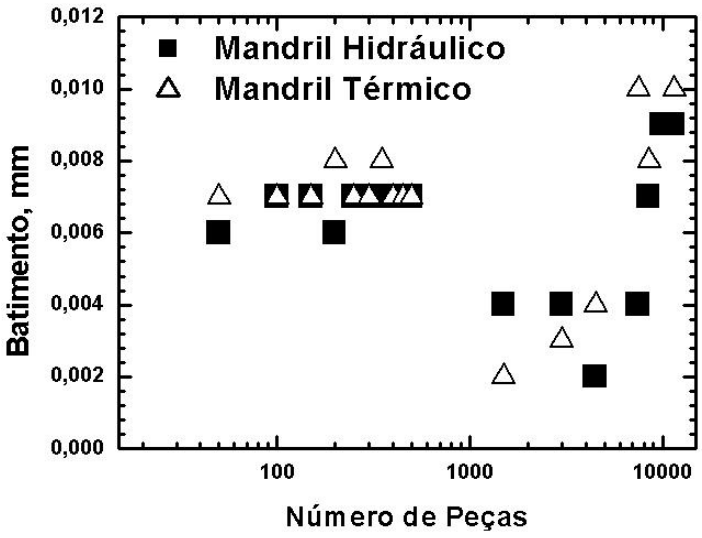
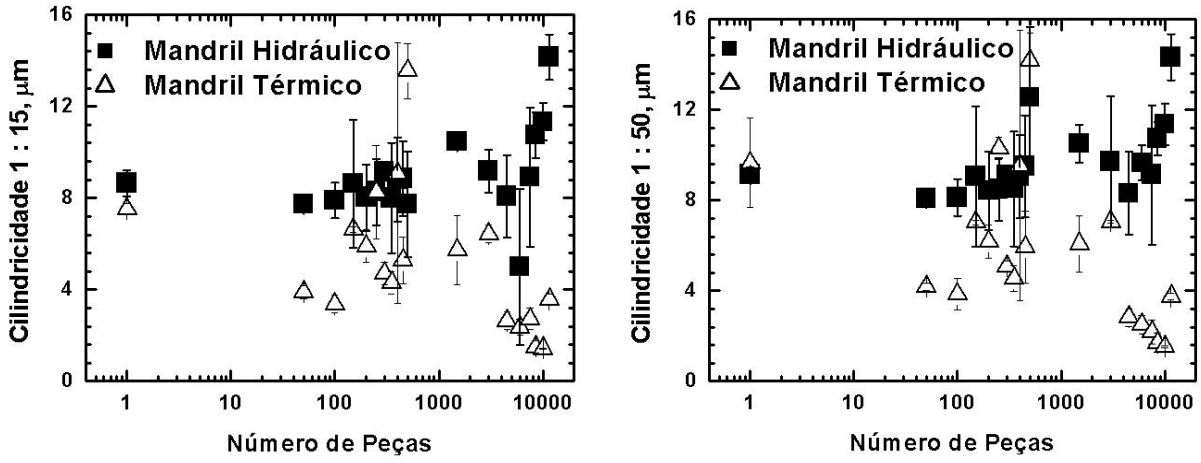


Figura 61: Evolução do batimento das ferramentas em relação ao número de peças usinadas até 11.500.

Observa-se que a evolução do erro de batimento não experimentou um crescimento consistente com o número de peças usinadas com exceção do intervalo de 3500 à 11.500. Igualmente à situação das peças de número 1 até 500, esta variação do erro de batimento não afetou os parâmetros geométrico e de superfície.

Na figura 62 (a) e (b) mostra-se a evolução da cilindricidade com dois filtros gaussianos, respectivamente, de 1:15 e 1:50 em função do número de peças usinadas. O filtro gaussiano 1:15 acentua a dispersão dos resultados em maior intensidade, quando comparado ao filtro 1:50, embora, aqui, constatou-se que o filtro 1:50 já se apresentava em condições de revelar a diferença na cilindricidade entre os dois sistemas de fixação térmico e hidráulico.



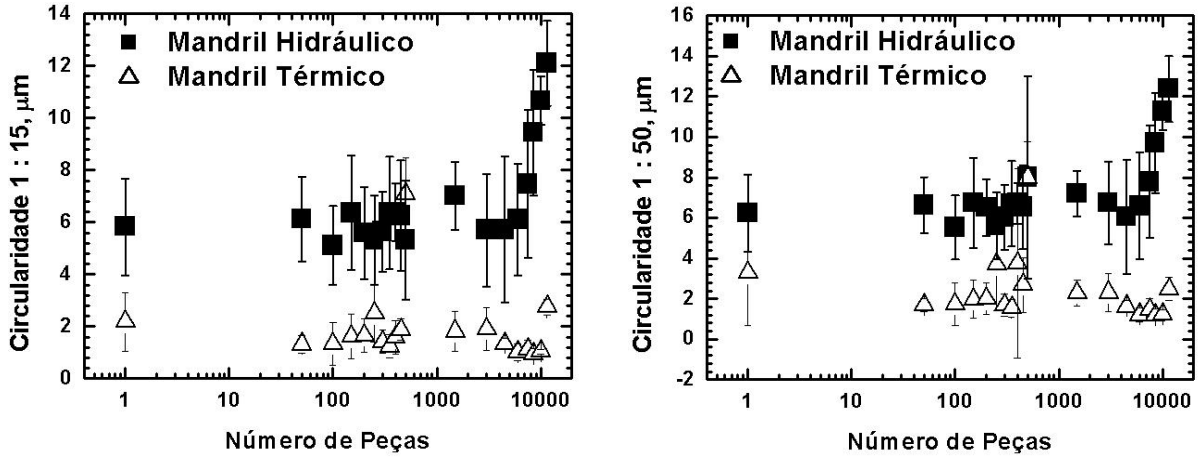
(a) (b)

Figura 62: Análise da cilindricidade dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico avaliados em dois filtros gaussianos de 1:15 e 1:50.

Neste caso conclui-se que é possível trabalhar com os dois tipos de filtro 1:15 ou 1:50. Observa-se também que o mandril térmico apresentou valores médios e desvios-padrão abaixo dos valores do hidráulico. Após a milésima peça usinada, esta discrepância tornou-se mais acentuada o que não foi justificado pelo batimento

Na figura 63 (a) e (b) mostra-se a evolução da circularidade com dois filtros gaussianos de 1:15 e 1:50 em função do número de peças usinadas.

Confirmou-se, aqui, também, o melhor desempenho do sistema térmico em comparação ao sistema hidráulico quer para filtro 1:15 ou 1:50.



(a) (b)

Figura 63: Análise da circularidade dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico avaliados em dois filtros gaussianos de 1:15 e 1:50.

Na figura 64 (a), (b) e (c) mostra-se a evolução dos parâmetros de superfície R_a, R_t e R_z para os sistemas térmico e hidráulico.O parâmetro de superfície R_a

evidencia que, ao longo do processo, os valores médio e desvios-padrão do sistema térmico foram menores em comparação ao hidráulico. A diferença entre os dois sistemas se acentuou para peças usinadas superiores a de 1500. Comparou-se o desempenho destes dois sistemas através da distribuição de resultados para um nível de confiança de 95%. Embora o teste de média tenha confirmado que o sistema térmico foi mais eficiente, não se chegou à conclusão da influência do material aderido nos parâmetros de superfície, uma vez que R_t / R_z não apresentaram resultados similares ao R_a (Figura 64 (b),(c)). Pode ser que o depósito de material sobre a broca tenha interferência na qualidade dos parâmetros de superfície, uma vez que, conforme observado no MEV, este depósito se apresenta com textura irregular ao longo da espessura e se altera ao longo do processo de furação.

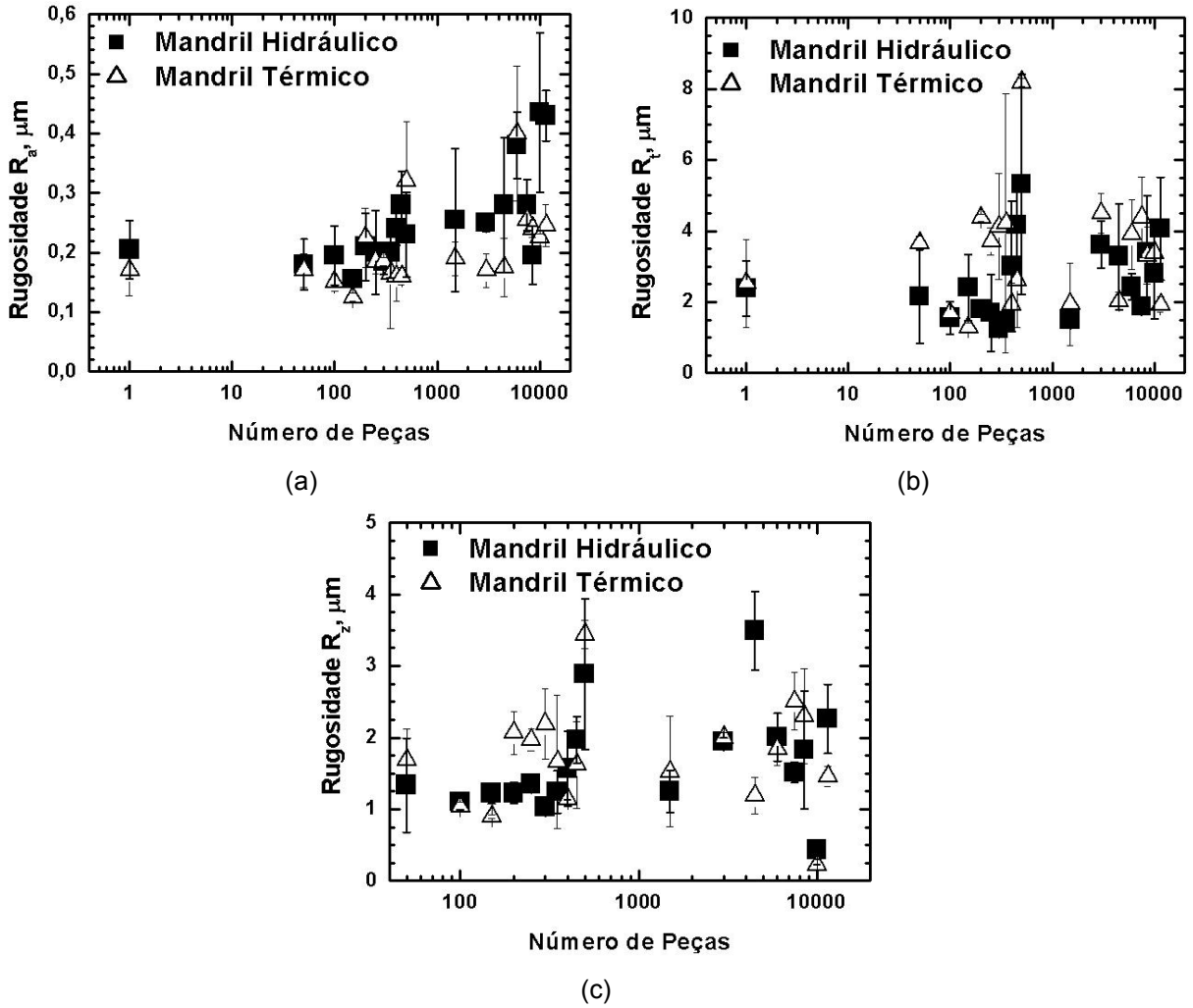


Figura 64: Análise da superfície R_a, R_t e R_z dos furos gerados pela broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico.

Na figura 65 mostra-se, respectivamente, o aspecto da superfície das faces 1 e 2 da broca ao microscópio eletrônico de varredura em diferentes ângulos de observação com aumentos de 160 e 250X para o sistema hidráulico.

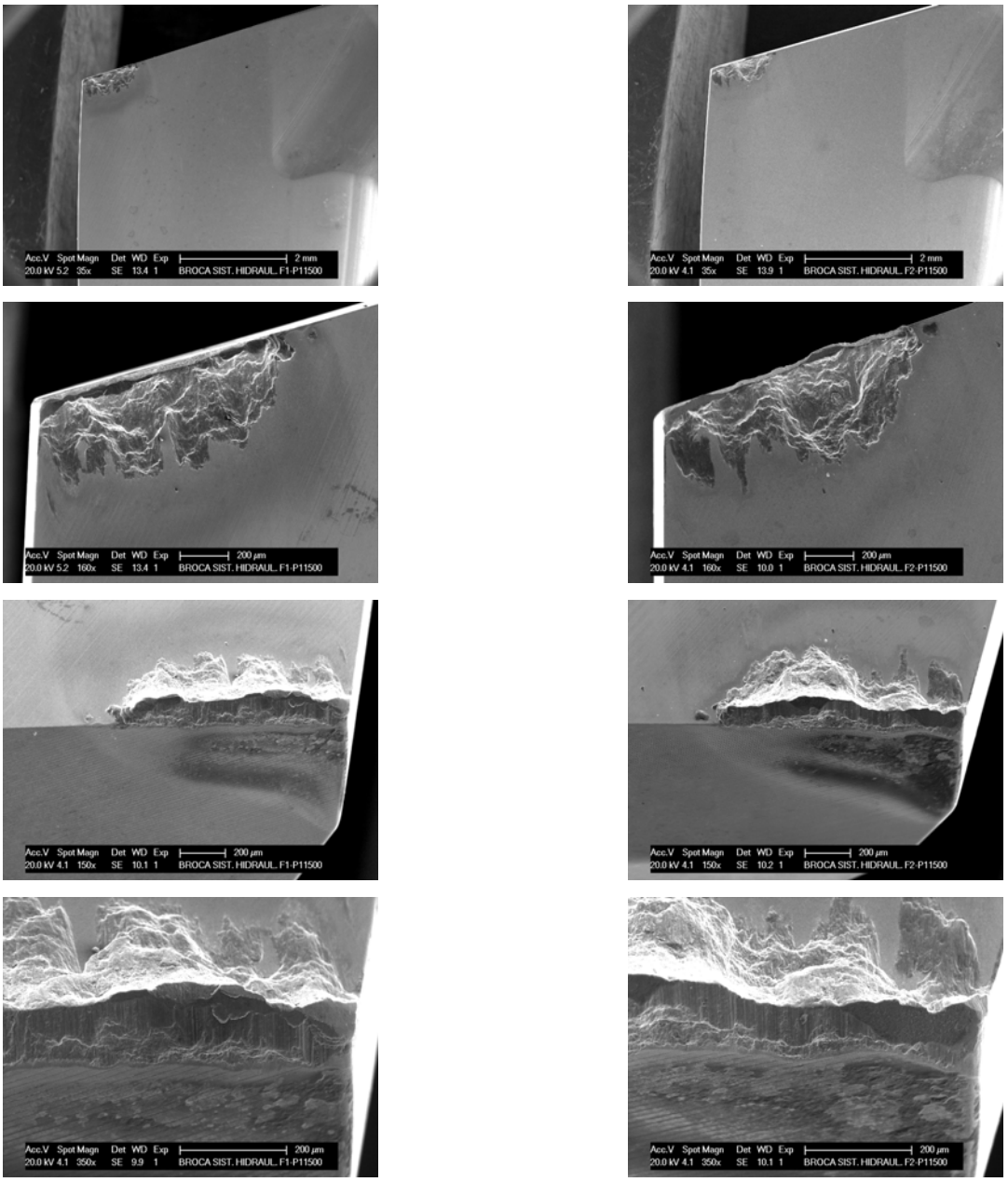
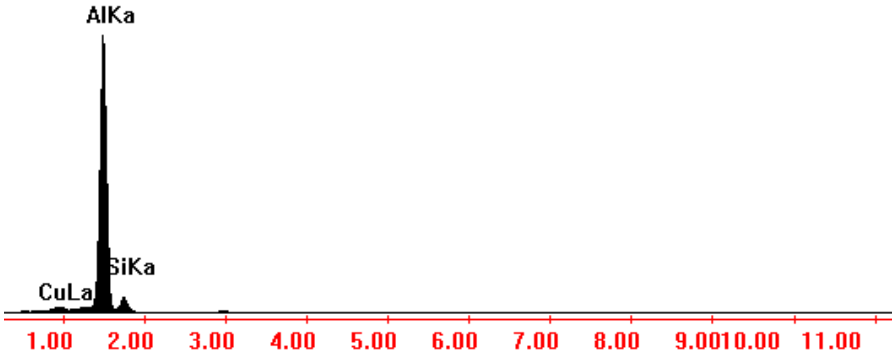
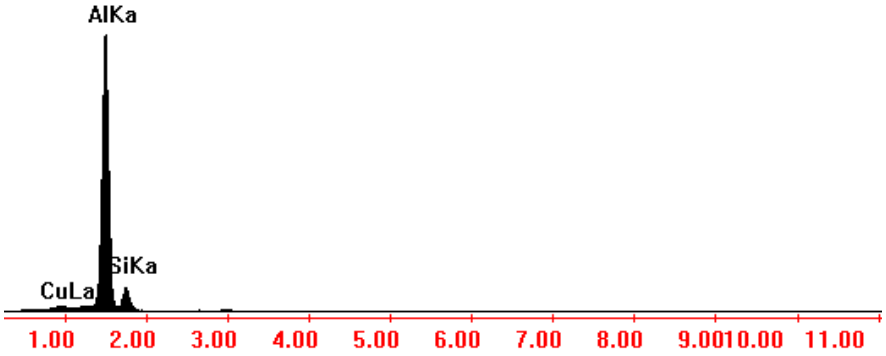


Figura 65: Presença de material da peça nas faces 1 e 2 da broca sistema hidráulico peça 11.500.

Na figura 66 mostra-se, respectivamente, o aspecto da superfície das faces 1 e 2 da broca ao microscópio eletrônico de varredura por processo de EDS (química) sistema hidráulico.



(a)



(b)

Figura 66: Análise química obtida por EDS em microscópio eletrônico de varredura do material aderido sobre a broca no mandril hidráulico.

Na figura 67 mostra-se o aspecto da superfície das faces 1 e 2 broca ao microscópio eletrônico de varredura diferentes ângulos de observação e aumentos de 160 e 250X para o sistema térmico.

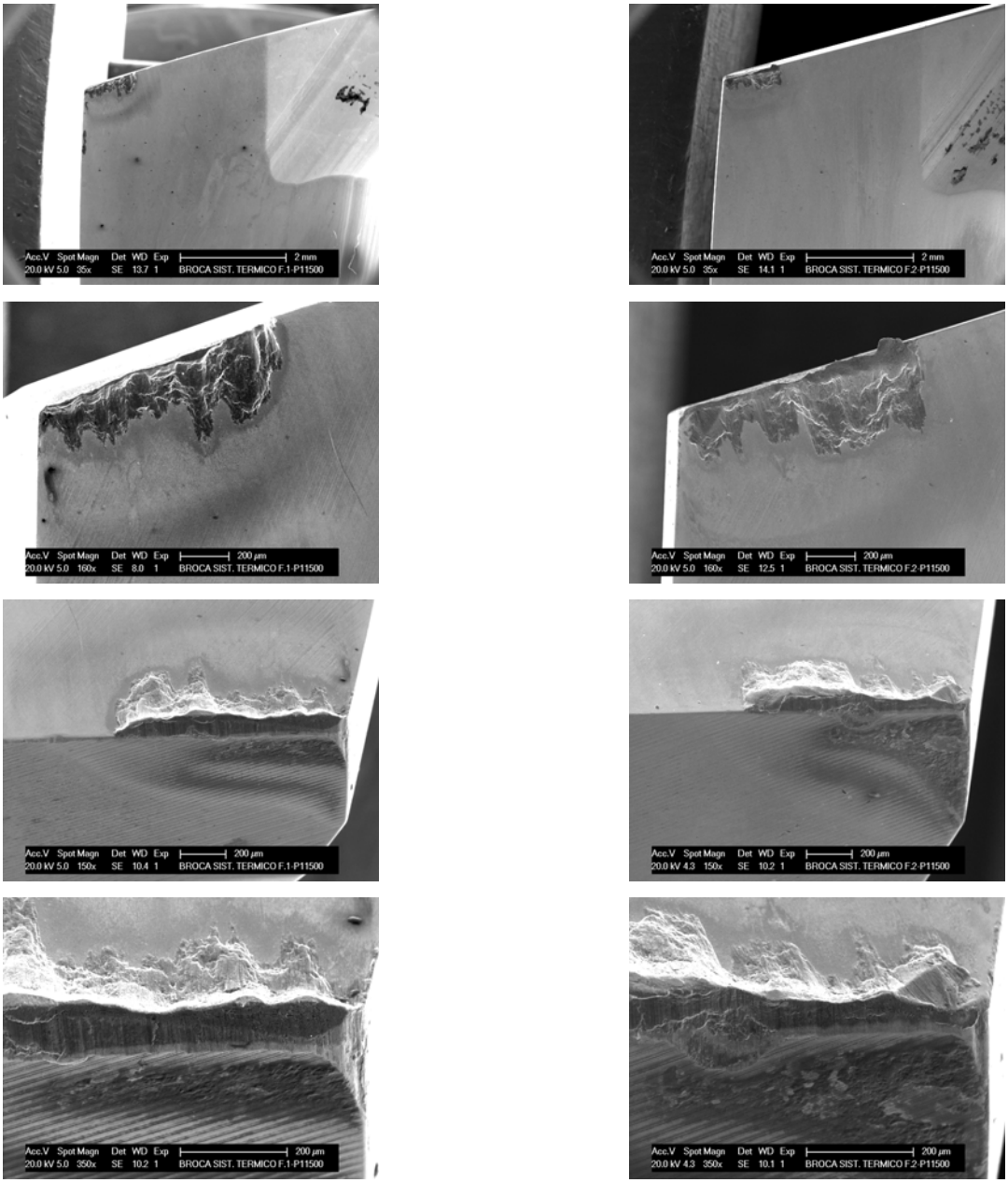
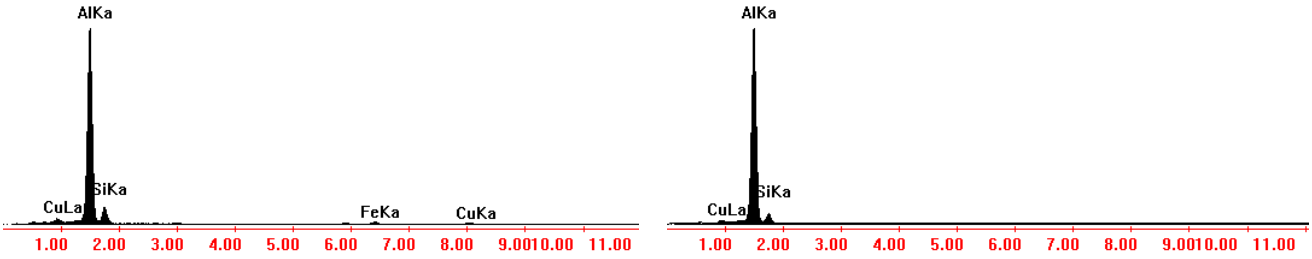


Figura 67: Presença de material da peça nas faces 1 e 2 da broca sistema térmico peça 11.500.

Evidencia-se a falta de uniformidade na espessura do desgaste e variação de textura no sentido da profundidade do desgaste. A análise química feita no microscópico eletrônico de varredura (MEV) do material presente nas faces 1 e 2 da broca fixação do sistema hidráulico após 11.500 peças produzidas mostrou a presença de Al e Si, conforme mostrado na (Figura 68).



(a) (b)

Figura 68: Análise química obtida por EDS em microscópio eletrônico de varredura do material aderido sobre a broca no mandril térmico.

Na figura 69, mostra-se a evolução do desgaste medido pelo VB_{max} em função do número de peças usinadas até 11.500.

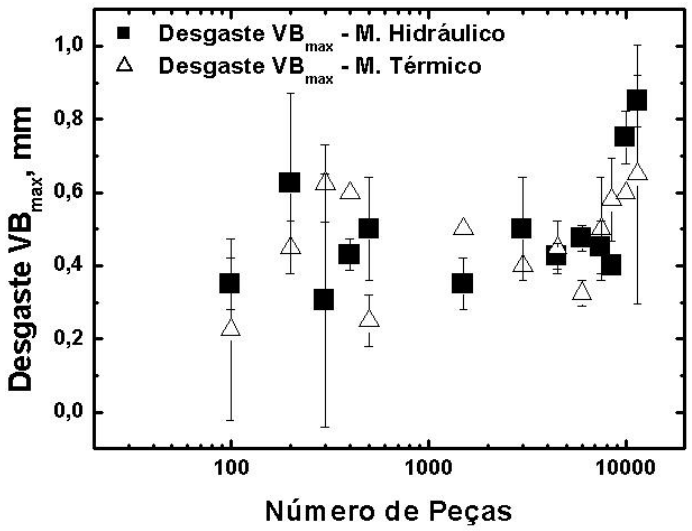


Figura 69: Análise do desgaste VB_{max} na aresta de corte da broca fixada nos sistemas térmico e hidráulico.

O valor do desgaste, para os dois sistemas, apresentou-se praticamente constante entre a peça de número 500 até 8500. A partir desta peça 8500, verificou–se a elevação do VB_{max} para o sistema hidráulico. O aspecto da curva VB_{max} em função do número de peças mostra semelhança com o proposto por (Quick et al. 2003) em que se tem as três etapas do processo de desgaste da broca helicoidal, quais sejam, perda progressiva, taxa de desgaste constante e falha catastrófica.

No entanto, até a peça de número 500 que corresponde a um tempo de usinagem de 6 horas não foi constatado alteração dimensional da broca e, sim, deposição de material do cabeçote sobre a superfície da broca. Concluiu-se, então,

que o estágio I não resulta em uma elevação rápida do desgaste nos primeiros instantes de corte e, também, esta taxa de desgaste não se reduz ao longo do processo. Observou-se a ocorrência de deposição e perda do material da peça sobre a superfície da broca de forma alternada ao longo do processo de furação com fluido de corte. Esta deposição e saída do material da peça sobre a superfície da broca provocou alterações de textura dos furos obtidos. No terceiro estágio do processo de desgaste para a peça de número 11.500, verificou-se a formação de região aquecida no flanco da broca (Figura 70).

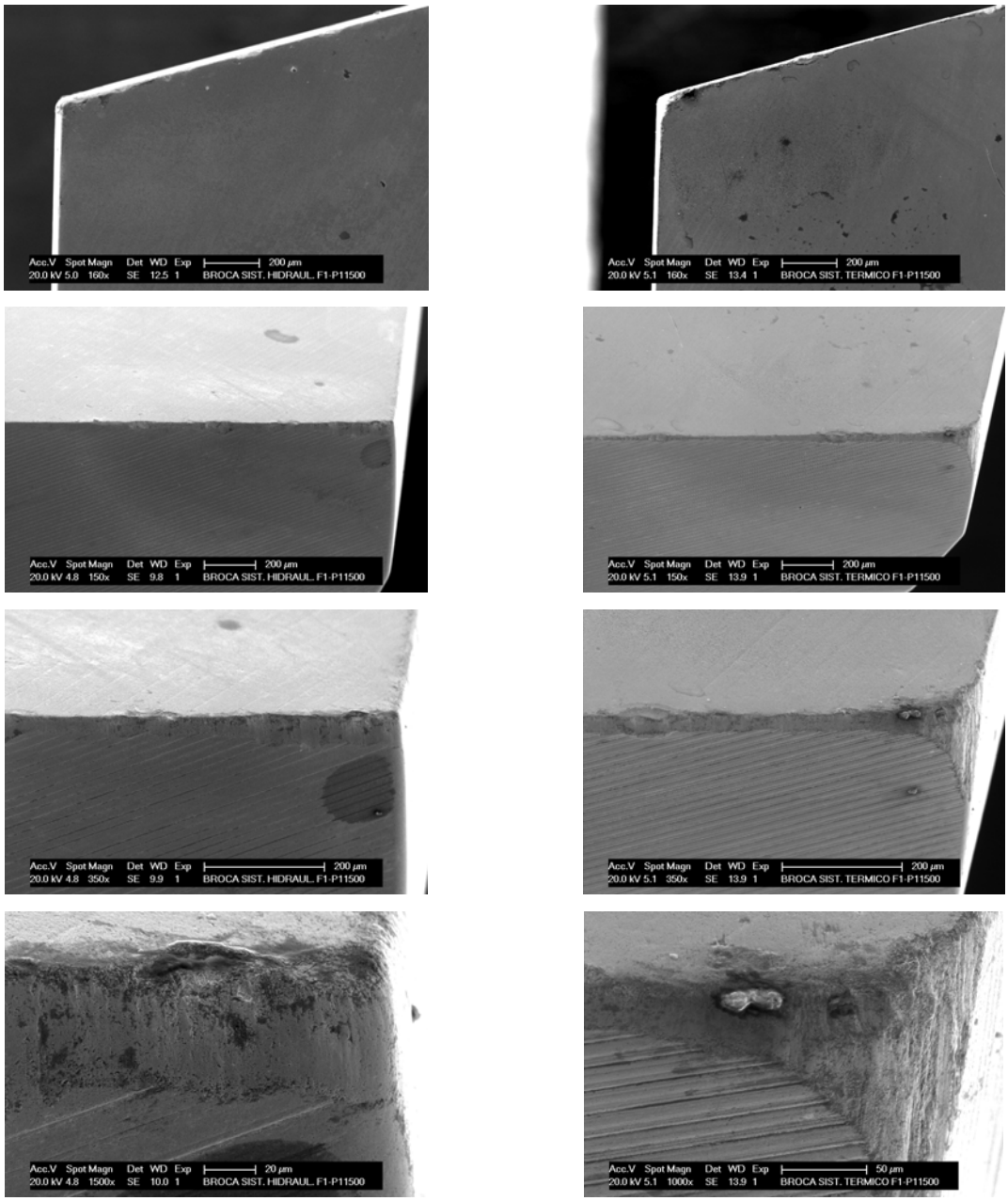
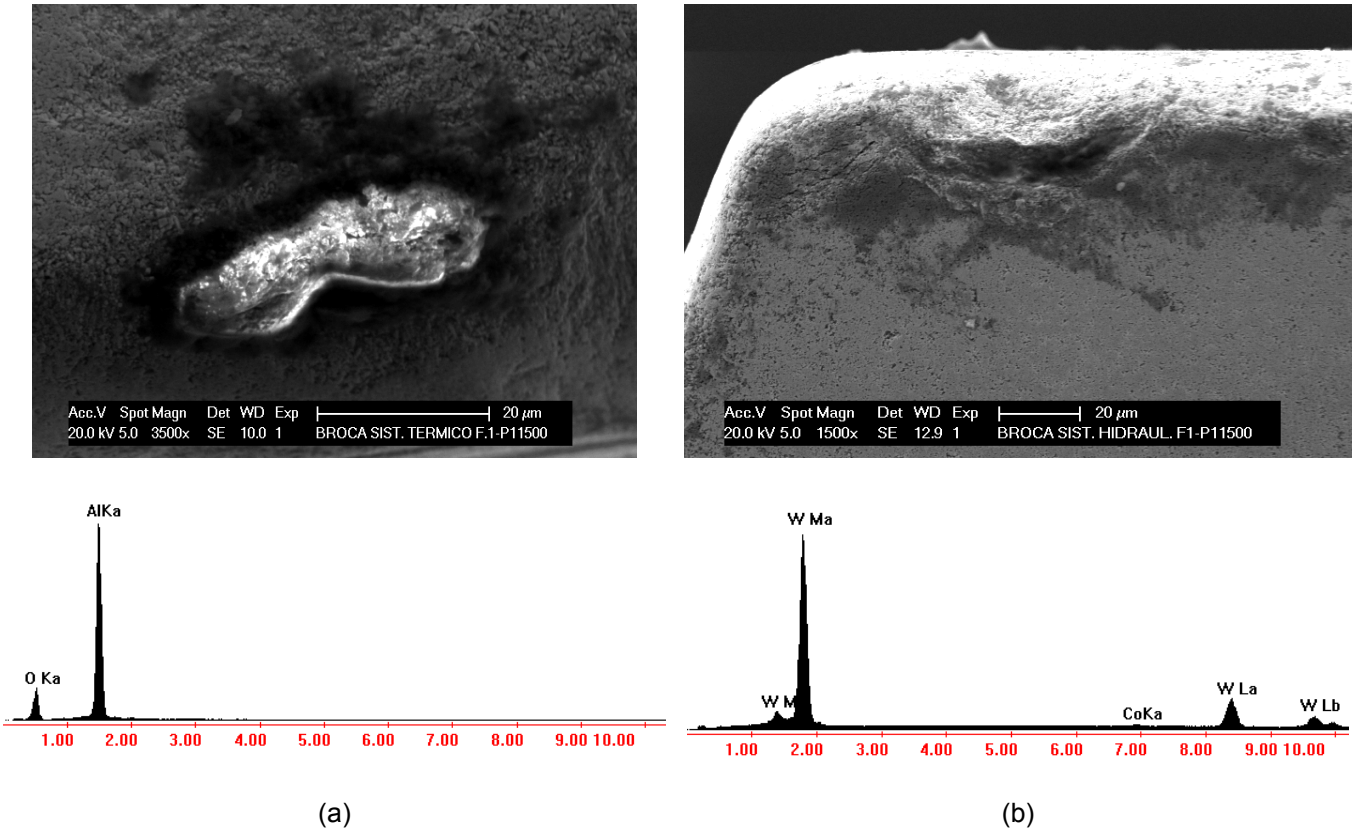


Figura 70: Desgaste da aresta de corte da broca do sistema térmico e hidraulico após decapagem em solução de NaOH nas face 1 na peça número usinada de número 11.500.

Observa-se que a zona próxima da aresta de corte aparece mais escura e coberta por muitos pits profundos, a textura da superfície da ferramenta original apresenta riscos abrasivos pelo fluxo de material. As zonas I (escura) e II (brilhante) são denominadas, respectivamente, como contato-plástico e elástico (Chou Kevin, Y., Hu, J., 2007). Tais modelos são atribuídos ao desgaste abrasivo causado pela remoção da camada do depósito da região de desgaste do flanco. Este aspecto distinto foi observado após usinagem e subseqüente limpeza do depósito por decapagem na solução de NaOH superior à 48 horas de contato. Além disso, a área escura apresentou presença de partícula de alumínio-silício aderida (Figura 71 (a)) e desgaste mais severo e trinca junto à aresta de corte da broca (Figura 71 (b)).

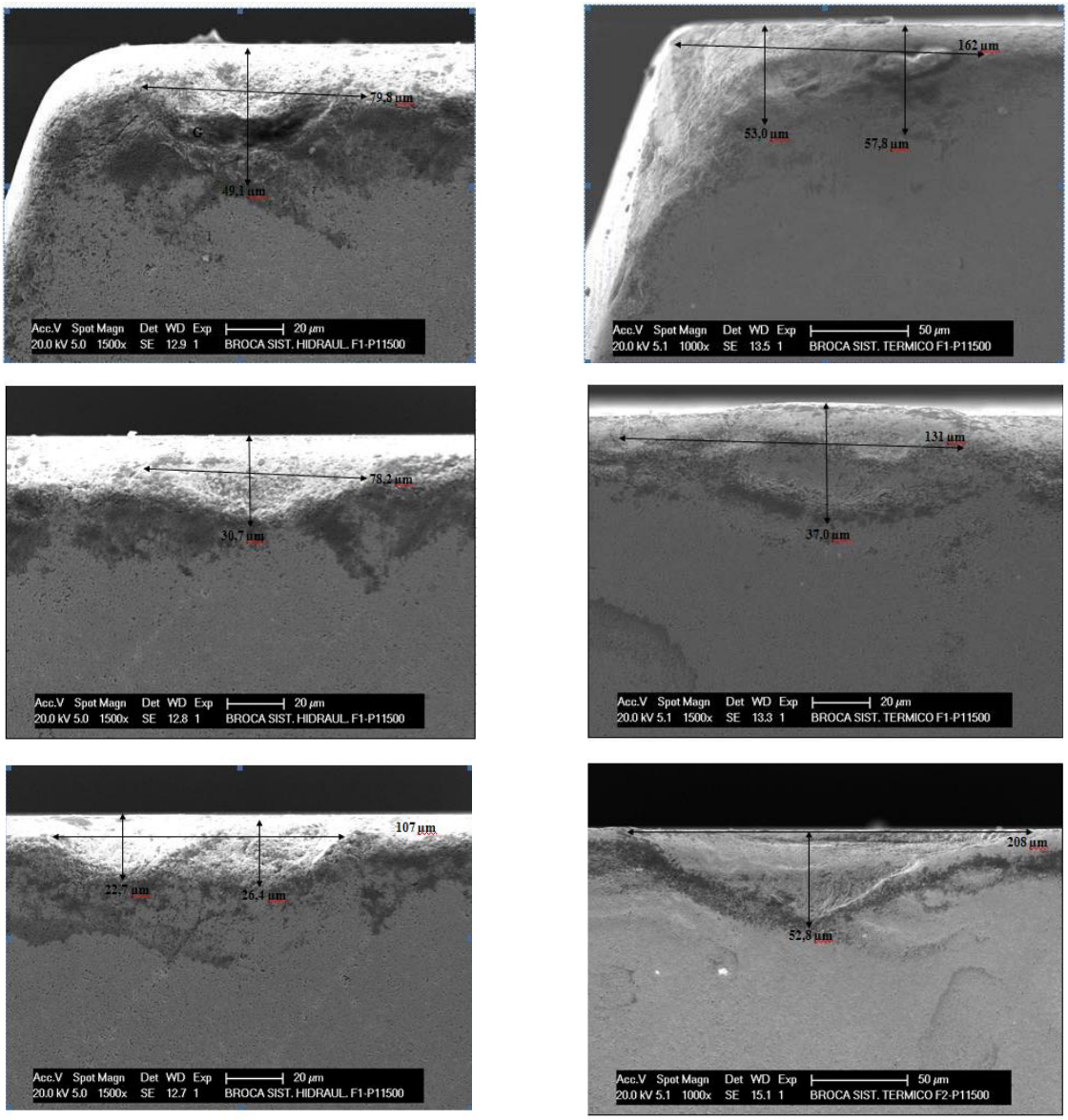


(a) (b)

Figura 71: Resíduo de alumínio fundido no WC-Co após 11.500 broca fixada no sistema térmico.

Observou-se também que na zona brilhante aparecem muitas saliências e ranhuras ao longo da direção de corte, evidência da abrasão de partículas duras da peça sobre a superfície. Contudo, a área inteira da zona II, figura 71(b) não tem o aspecto da zona adesiva como na zona I, figura 71 (a). Isto mostra que a aderência se tornou mais efetiva, e, possivelmente, com difusão do alumínio em direção ao WC-Co (Figura 71 (a)).

Mediu-se, também, o desgaste real após a decapagem no flanco da broca após 11.500 peças, constatando-se valor médio de 40,25µm com desvio-padrão de 10,20µm. Diferentemente das situações anteriores, agora, a broca apresentou desgaste por cracterização e não deposição de material da peça o que define o momento de reafiação para remoção de região danificada (Figura 72 (a) e (b)).



(a) Desgaste por entalhe broca sistema hidráulico (b) Desgaste por entalhe broca sistema térmico

Figura 72: Desgaste de flanco maxímo da broca fixada nos sistemas térmicos hidráulico.

Na figura 73 mostra-se variação dos valores médios e desvio padrão do diâmetro gerado pelas brocas fixadas nos sistemas hidráulico e térmico.

O sinal de aquecimento com sulcos na aresta de corte acrescido de lascamento e craterização na aresta de corte alterou o diâmetro do furo para valores próximos ao limite superior (12,20mm) de especificação o que contribuiu para delimitar a vida da broca.

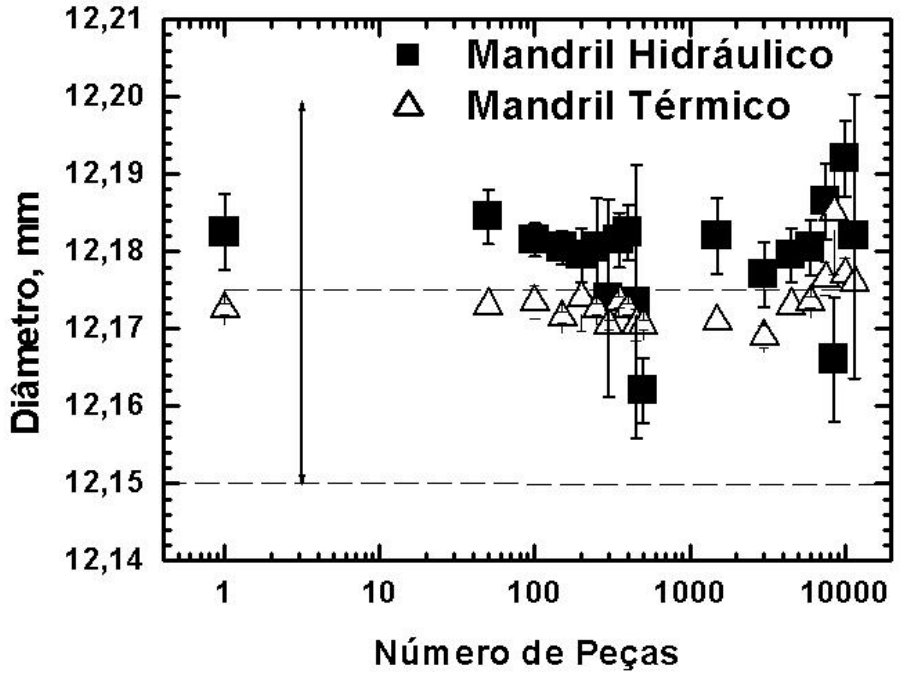


Figura 73: Diâmetro do furo de fixação da bucha de referência em função do número de peças.

CONCLUSÕES

O erro de batimento não apresentou evolução consistente com o número de peças usinadas tanto para o sistema de fixação térmico como hidráulico e também não interferiu nas dimensões e textura dos furos obtidos.

Os valores médios e dispersão da cilindricidade e circularidade obtidos pelo sistema hidráulico foram maiores que os valores obtidos pelo sistema térmico, o que pode ser evidência da maior rigidez da montagem por interferência do sistema térmico.

O sistema de fixação térmico produziu superfícies com valores médios e desvio padrão de R_a inferiores aos obtidos pelo sistema hidráulico. Notou-se que as variáveis R_t e R_z comportaram-se de modo diferente do parâmetro de rugosidade R_a e o erro de batimento não contribuiu para esta anomalia de resultado.

O desgaste avaliado pela média das espessuras no flanco não revelou crescimento consistente com o número de peças tanto para o sistema térmico quanto para o hidráulico. Esta medição revelou-se não se tratar efetivamente de desgaste da broca e, sim, material do cabeçote aderido ao flanco.

A evolução do desgaste avaliado pela espessura de flanco não mostrou aspecto similar ao encontrado em curvas de desgaste tanto para o estágio I quanto para o estágio II. Não se observou, também, uma taxa elevada desgaste excessivo correspondente ao estágio I e nem taxa de desgaste constante no estágio II.

A variação de parâmetros de superfície mostrou sensibilidade à presença de material depositado no flanco no intervalo entre a peça usinada de número 1 a 500.

Constatou-se a elevação do número de peças usinadas de 8000 para 11.500 em razão da não obtenção do diâmetro do furo acima da especificação de projeto do mesmo.

Baseado nesta premissa de retirada da broca de trabalho pode-se, também, constatar que o sistema térmico produziu furos com diâmetro e textura mais bem comportados que o sistema hidráulico o que sugere a proposição de aumento de vida útil.

Não se verificou o aspecto da curva de evolução do desgaste em função do tempo de usinagem com evidência dos estágios I, II e III, uma vez que neste

processo ocorreu deposição de material sobre a broca e não desgaste efetivo da mesma.

A espessura média de desgaste observada na peça de número 11.500 foi de 40,25µm com desvio padrão de 10,20µm.

TRABALHOS FUTUROS

Estudar a furação de ligas Al-Si sem lubrificação e brocas revestidas.

Desenvolver e estudar a implementação do equipamento utilizado para aquecimento do sistema de fixação térmico.

Estudar a comparação e correlação entre os diferente métodos de avaliação de desgaste de broca e os seus mecanismos.

Avaliar a influência dos parâmetros de corte nos diferentes mecanismos de desgaste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-MAHFOUZ, ISSAM **Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network** International Journal of Machine Tools & Manufacture, n.43, pp 707-720, 2003.

ALPAS, A.T.; BHOWMICK, S. **The performance of hydrogenated and non-hydrogenated diamond–like carbon tool coating during the dry drilling of 319Al** International Journal of Machine Tools & Manufacture 48, pp 802-814, 2008.

AMORIM, H. J., **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 2002.

ARENAS MIRANDA, G. W., **Uma contribuição ao processo de furação sem fluido de corte com broca de metal duro revestida com TiAlN** Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, Brasil, 2003.

ARMAREGO, E. J. A.; BROWN, R. H, **The Machining of Metals.** New Jersey. Prentice Hall, pp. 2-9 e 96-119, 1967.

ARNONE, M., **High Performance Machining.** Cincinnati, Hanser Gardner Publications, 297 pp, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: AMERICAN SOCIETY FOR METALS – Metals Handbook, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6176: Brocas helicoidais. Terminologia. Rio de Janeiro, 1977.

BEZERRA, A. A., **Influência dos principais parâmetros de corte no processo de alargamento de uma liga de alumínio–silício** Dissertação de mestrado Universidade Federal de Uberlândia, MG, 1998.

BEZERRA, A. A.; MACHADO, A. R.; SOUZA, A. M.; EZUGWU, E. O., **Effects of machining parameters when reaming aluminium-silicon (SAE 322) alloy.** Journal of Materials Processing Technology, v 112, pp 185-198, 2001.

BONO, M.;NI,J. **The effects of thermal distortions on the diameter and cylindricity of dry drilled holes** International Journal of Machine Tools & Manufacture , vol n.41, pp. 2261-2270, 2001.

BOOSER, E. R., **Handbook of Lubrication - Theory and Practice of Tribology.** v. II. 6°Ed., pp. 335- 379, 1988.

BHOWMICK,S., ALPAS, A.T. **Minimum quantity lubrification drilling of aluminum –silicon alloys in water using diamond–like coated drills** International Journal of Machine Tools & Manufacture 48, pp 1429-1443, 2008.

BRAGA, D.U; DINIZ, A.E; MIRANDA, G.W.A; COPPINI, N.L. **Using a minimum quantity of lubrificant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum-silicon alloys** Journal of Materials Processing Technology , n.122, pp 127-138, 2002.

CAPUANO, M. N., **Avaliação e Monitoração do Desgaste de Ferramentas no Processo de Furação.** Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, pp 148, 2004.

CHOU, Y. K.; HU, J. **Characterization of cutting tool flank wear-land contact** WEAR 263, pp 1454-1458, 2007.

COTTERELL, M.G.; KELLY, J.F. **Minimal lubrication machining of aluminium alloys** Journal of Materials Processing Technology , n° 120, pp 327-334, 2002.

DHAR, N.R, KAMRUZZMAN, MD., SOUMITRA, P. **Wear behavior of uncoated carbide inserts under dry, wet and cryogenic cooling conditions in turning C-60 steel** Associação Brasileira de Ciências Mecânicas,abril-junho,n° 2, pp146-152, 2006.

DEUTCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN 1836: **Anwendungsgebiete der Werkzeugentypen N, und W.** Berlin, 1977.

DINIZ, A, E. MARCONDES, F, C. COPPINI, N.L., **Tecnologia da Usinagem do Materiais.** ArtLiber, 2 ed, 2000.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L., **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** MM Editora: São Paulo, pp 242,1999.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L., **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 4. ed. São Paulo: Artliber, 2001.

DROZDA, T. J.; WICK, C.; **Tool and Manufacturing Engineers Handbook Machining.** v.1, 4ed, 1983.

ECKHARDT, M.; **Utilização de alargadores de gume único regulável para a obtenção de furos de precisão** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis: 1993.

EDWARDS, R., **Cutting Tools. The Institute of Materials.** London. The University Press, Cambridge. pp 200, 1993.

EL BARADIE, M., A., **Cutting Fluids: Part l. Characterisation.** Journal of Materials Processing Technology, Dublin, n. 56, pp. 786-797, 1996.

ERTUNC, H. M.; OYSU, C. **Drill wear monitoring using cutting force signals** Mechatronics; v. 14, pp 533-548, 2004.

FACCIO, I., **Investigações sobre o acabamento superficial de usinagem com altíssima velocidade de corte** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, USP, São Paulo, Brasil, 2002.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** São Paulo: Edgard Blücher pp 751, 1977.

FIEDLER, U.; WÜRZ, T., **Fixação e balanceamento de ferramentas** Máquinas e Metais, n. 421, p. 24-37, 2001.

GUHRING, Catlogo Manuais e boletins Técnicos, 2005.

GONÇALVES, ARMANDO ALBERTAZZI JR., **Apostila de Metrologia** - parte l, Labmetro – UFSC, 2001.

HARRIS, S.G.; VLASVED, A.C; DOYLE, E.D;DOLDER, P.J. **Dry machining – commercial viability through filtered arc vapour deposited coating** Surface and Coating Technology , n.133-134, pp 383-388, 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZANTION FOR STANDARDIZANTION, ISO 3685: **Tool-life testing with single-point turning tools,** 2a ed, Genève, pp 48, 1993.

KALIDAS, S.; DE VOR, R.E.; KAPOOR, S.G.- **Experimental investigation of the effect of drill coatings on hole quality under dry and wet drilling conditions** – Surface and Coating Technology, n.148, pp 117-128, 2001.

KING, A.A; COMPTON, W.D; CHANDRASEKAR, S.; SHANKAR, M.R. **Characteristics of aluminum 6061-T6 deformed to large plastic strains by machining** Materials Science and Engineering A , v 410-411, pp 364-368, 2005.

KE, F., Ni, J. e STEPHENSON, D. A. **Continuous chip formation in drilling** International Journal of Machine Tools & Manufacture, article in press, pp. 1-7, 2005.

KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G., **Presented at the Opening Session Dry Cutting CIRP.** Annals, v. 46 (2), pp 519-526, 1997.

KÖNIG, W.; RUMMENHÖLLER, S., **As indústrias estão tendo que orientar ecologicamente seus processos produtivos.** Máquinas e Metais, São Paulo, n.387, p 22-29, abril 1998.

KRESS, D. EL., **Escariado con altas velocidades.** Stuttgard, Tese de Doutorado - Universidad de Stuttgard, 1974.

LAHRES, M.; MULLER-HUMMED, P; DOERFELD O. - **Applicability of different hard coating in dry milling aluminium alloys** - Surface and Coating Technology – n 91, pp 116-121, 1997.

LIN, K.L.; CHAO,W.H; WU,C.D. **The performance and degradation behaviours of the TiAlN/interlayer coating on drills** Surface and Coating Technology – n 89, pp 279-284, 1997.

MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. **Corte a seco com mínima quantidade de fluido e com fluido em abundância**: Uso, aplicações, vantagens e desvantagens, Usinagem, Feira e Congresso, Anais em CD, 19-14H00-I.pdf, setembro 2000.

MACHADO, R. A.; SILVA, M. B., **Usinagem dos metais, 4º versão, Uberlândia.** Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem UFU, pp 180-190, 1999.

MARCONDES, F.C. **A história do metal duro** Editado pela Sandvik Coromant, 1990.

MICHELETTI, G., F., **Mecanizado por Arranque de Viruta.** 1.ed. Barcelona : Blume, n 3, pp 124-130, 1980.

MOTTA, M., F.; MACHADO, A., R., **Fluidos de Corte: Tipos, Funções, Seleção, Métodos de Aplicação e Manutenção.** Máquinas e Metais, São Paulo, n. 356, pp 44-56, 1995.

NOUARI, M.; LIST,G.;GIROT,F.;COUPARD, D. **Experimental analysis and optimization of tool wear in dry machining of aluminium alloys** Wear , n 248, pp 1359-1368, 2003.

NOUARI, M.; LIST,G.;GIROT,F.;GÉHIN,D. **Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys** International Journal of Machine Tools & Manufacture, n 45, pp 1436-1442, 2003.

NOVASKI, O., **Contribuições ao Processo de Furação com Brocas Helicoidais.** Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, pp 31, Tese de Livre Docência 1996.

OLIVEIRA C J., **Avaliação da Influência de Sistemas de Filtragem Aplicados a Topografia de Superfície em Usinagens** Dissertação de Mestrado PUC Minas, 2004.

OZCELIK, B. ; BAGCI, E. **Investigation of the effect of drilling condition on the twist drill temperature during step-by-step and continuous dry drilling** Materials and Design, n 27, pp 446-454, 2006.

POULACHON, G., MOISAN, A. L. e DESSOLY, M. **Contribution à l'étude des mécanismes de coupe en tournage dur: A contribution to the study of the cutting mechanisms in hard turning** Mécanique & Industries, v. 3, n° 4, pp 291-299, 2002.

QUICK , D.; AUDY, J.;VLASVELD, A.C;DOYLE,E.D;HARRIS,S.G. **A study of the wear mechanisms of $Ti_{1-x}Al_xN$ and $Ti_{1-x-y}Al_xCr_yN$ coated high-speed steel twist drills under dry machining conditions** Wear 254, pp 723-734, 2003.

REIS, D. D.;ABRÃO, A. M. **The machining of aluminium alloy 6351** Journal Engineering Manufacture, v 219, part B, pp 27-33, 2005.

RENEVIER, N.M; TEER, D.G.; ASPINWALL, D.K.; DEWES, R.C.; COLDWELL, H.L. **The use of soft/ lubricating coating when dry drilling BS L168 aluminium alloy** Surface and Coating Technology, n 148, pp 716-726, 2004.

SALES, W. F.;SANTOS, S. C., **Fundamentos da Usinagem dos Materiais,** Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2003.

SANDVICK., Catálogo Manuais e Boletins Técnico, 2003.

SATURNINO, L. J. M., **Desenvolvimento de Ferramentas para Definição, Análise e Avaliação de Desempenho de Veículos Automotivos,** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC Minas, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2004.

SCHULTZ, H.; MORIWAKI, T., **High Speed Machining. Annals of the CIRP**, v. 41, n.2, pp 637-643, 1993.

SCHULZ, H. **Hochgeschwindigkeitsbearbeitung - High-Speed Machining. München: Carl Hanser Verlag**, pp 286, 1996.

SHAW, M. C., **Metal Cutting Principles** Oxford University Press, ISBN 0-19-859002-4, 1984.

SILLIMAN, J., D., **Cutting and Grinding Fluids:** Selection and Application. 2.ed. Dearborn, Michigan; Society of Manufacturing Engineers, pp 216, 1992.

STEVEN, R. S. et al., **Lubrication Mechanisms for Oil-in-Water Emulsions** Lubrication Engineering, Park Ridge, Illinois, v. 52, n. 2, pp 168-175, February 1996.

SUÁREZ, P.,B.;ASENSIO–LOZANO,J. **Department of Materials Science and Metallurgical Engineering**, Univerty of Oviedo, 13 independence st. Oviedo, E-33004 Asturias, Spain, 2005.

SUBRAMANIAN, S.V.; GEKOND, H.O., **Tribology of tool-chip interface and tool wear mechanism** Surface and Coating Technology, n 149, pp 151-160, 2002.

SUNDARAJAN, G.; JOSHI, S.V; SRINIVASA RAO, D.; FAISAL, N.H.;SOMA RAJU, K.R.C. **Electro-spark coating for enhanced performance of twist drills** Surface & Technology , n 202, pp 1636-1644, 2008.

TEER, D.G., WALBANK, J.; HICKMAN, S.; THOMAS, N.R; WAIN, N. **Performance of low-friction coating in the dry drilling of automotive Al-Si alloys** Surface & Coating Technology, n 200, pp 1885-1892,2005.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K., **Metal Cutting ,** Butteworths-Heinemann. 4.ed. Ltd, London, 2000.

TSAO, C.C.; CHEN, W.C. **Cutting performance of different coated drills** Journal of Materials Processing Technology, n 88, pp 203-207, 1999.

VENKATESH, V.C.; XUE, W. **A study of the built-up edge in drilling with indexable coated carbide inserts** Journals of Materials Processing Technology ,n 58,pp 379-384, 1996.

VLASVELD, A.C; QUICK , D.; AUDY, J.; DOYLE,E.D;HARRIS,S.G.; LONG,J.M **Influence of chromium contente on the dry machining performance of cathodic arc evapored TiAlN coating** Wear 254, pp 185-194, 2003.

WECK, M. WERKZEUGMASCHINEN**., Fertigungssysteme, Band 4: Meßtechnische Untersuchung und Beurteilung. 5. Auflage. Düsseldorf : VDI Verlag**, pp 213-367, 1996.

WEINERT, K.; ADAMS F. J.; BIERMANN, D.; THAMKE, D., **Alargadores de corte único:** corte mais eficiente, além de vantagens econômicas. Revista Máquinas e Metais, São Paulo, n 392, pp 38-57, 1998.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B., **Processos de usinagem e ferramentas de corte.** Florianópolis: UFSC, 2000. Apostila.

WHEN-CHOU CHEN; KUANG-HUA FUH **Cutting performance of thick web drills with curved primary cutting edges** International Journal of Machine Tools and Manufacture , v 35, n 7, pp 975-991.

WHITEHOUSE D.J., **Handbook of Surface Metrology ,** Leicester –England, 1994.

ZHANG, M.Z.; LIU, Y. B.; ZHOU, H. **Wear mechanisms maps of uncoated HSS tools drilling die-cast aluminum alloy** Triblology International, n 34, pp 727-731, 2001.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo